

## Glosario

A continuación se describe un listado de términos utilizados para la comprensión del documento.

### Terminología de gestión ambiental

*Residuo.* Cualquier sustancia u objeto de los que su poseedor se desprenda o tenga la obligación de desprenderse, y que pueda producir una alteración perjudicial en el medio ambiente.

*Productor/poseedor.* Cualquier persona, física o jurídica, que en su actividad produzca residuos como productor inicial y que efectúe operaciones de tratamiento previo, de mezcla o de otro tipo que ocasione un cambio de naturaleza o composición de estos residuos, y toda persona física o jurídica que los tenga en posesión y no tenga la condición de gestor de residuos.

*Transportista.* Es la persona, física o jurídica, que, con la autorización de la Junta de Residuos, realiza la operación de traslado desde el lugar de generación del residuo hasta la planta de reciclaje, tratamiento y rechazo.

*Gestor del residuo.* Es la persona, física o jurídica, que, con la autorización de la Junta de Residuos, lleva a término la valorización, tratamiento o rechazo.

*Valorización.* Es la recuperación, aprovechamiento y/o el reciclado de determinadas materias o sustancias contenidas en los residuos industriales.

*Reciclado.* Es la transformación de los residuos, dentro de un proceso de producción, para su fin inicial o para otros fines.

*Tratamiento.* Es aquella operación o conjunto de operaciones orientadas a la reducción o neutralización de la toxicidad asociada al residuo, y, acondicionar todo aquel que posteriormente se destine a vertedero autorizado.

*Rechazo o desperdicio.* Residuo o fracción del mismo no valorizable.

*Caracterización.* Es el conjunto de operaciones destinadas a definir las características físicas, químicas y biológicas de un residuo, a partir del cual se toman decisiones para vincularlo hacia uno u otro sistema de gestión, o para evaluar su potencial efecto ambiental. La caracterización del residuo comporta un proceso analítico, realizado por laboratorios acreditados por la Junta de Residuos, en los cuales, se determinan los parámetros constitutivos del residuo. Los resultados obtenidos permiten decidir el código mas adecuado y la categoría (inerte, no especial o especial) de acuerdo con el Catálogo de residuos de Cataluña así como el destino mas apropiado para el residuo.

*Residuo inerte.* Es todo aquel que una vez depositado en un vertedero, no experimenta transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas y cumple con el criterio de lixiviado.

*Residuo especial.* Cualquier residuo que por sus características físicas, químicas, biológicas, tóxicas o peligrosas o por causa de su grave concentración, requiere un tratamiento específico y un control periódico para evitar sus efectos nocivos potenciales para la salud o el medio ambiente.

*Residuo no especial.* Todo residuo que no pueda ser clasificado como especial o como inerte.

*Lixiviado.* Tratar una sustancia compleja con el disolvente adecuado para obtener la parte soluble de ella.



## Sumario

<b>GLOSARIO</b>	<b>1</b>
<b>SUMARIO</b>	<b>2</b>
<b>A. COMPLEMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>5</b>
A.1. Otras propiedades del aluminio	5
A.2. Procesos y maquinaria de forja	5
A.3. Otras aleaciones de aluminio para forja tratables térmicamente	6
A.4. Aleaciones de aluminio para forja no tratables térmicamente	9
A.5. Otras aleaciones de aluminio para colada	10
A.6. Otros tratamientos térmicos de las aleaciones de aluminio	12
A.6.1. Recocido de ablandamiento, estabilización	12
A.6.2. Normalizado	12
A.6.3. Recocido total, homogeneización	13
A.7. Designación de las aleaciones de aluminio y sus tratamientos	14
A.7.1. Designación según UNE 38 300, UNE 38 200 y UNE 38 002	14
A.7.2. Designación según DIN 1700, DIN 1725 y DIN 17007	18
A.7.3. Designación según ANSI H35.1	21
A.8. Resistencia a la compresión, flexión, corte y torsión	22
A.9. Resistencia a la fatiga	23
A.9.1. Ensayos de fatiga	25
<b>B. COMPLEMENTOS PARA LA FABRICACIÓN DE LA ESTRUCTURA</b>	<b>29</b>
B.1. Planos y esquemas de las geometrías de la estructura	29
B.2. Elección del material de aportación para soldadura	39
B.3. Tecnología aplicada para los trabajos de soldadura. Soldadura MIG	42
B.3.1. Soldadura MIG con corriente continua	42
B.4. Análisis químico sobre producto	44
<b>C. PREPARACIÓN DE MUESTRAS</b>	<b>47</b>
C.1. Montaje de muestras. Probetas metalográficas	47
C.2. Historial de elaboración de probetas metalográficas	49
<b>D. DETALLE DE LOS ENSAYOS EFECTUADOS</b>	<b>55</b>
D.1. Ensayos de tracción y compresión a carga máxima	55
D.1.1. Ensayos de tracción	55
D.1.2. Ensayos de compresión	58
D.2. Análisis de la pérdida de propiedades en ZAT	61
D.2.1. Unión entre aleaciones L-3453 T4 y L-3453 T4	61
D.2.2. Unión entre aleaciones L-3453 T4 y L-3453 T6	64
D.2.3. Unión entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T6	67
D.2.4. Unión entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T4	70
D.2.5. Unión entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T6	73



<b>E.</b>	<b>DETALLE DE LOS ENSAYOS DE OPTIMIZACIÓN. REENVEJECIDO ZAT</b>	<b>77</b>
E.1.	Unión entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T6.....	77
E.2.	Unión entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T6.....	92
E.3.	Unión entre aleaciones L-3453 T4 y L-3453 T4.....	99
<b>F.</b>	<b>ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA)</b>	<b>107</b>
F.1.	Introducción .....	107
F.2.	Datos generales de la actividad propuesta .....	107
F.3.	Descripción de la actividad.....	108
F.4.	Evaluación de los efectos del proyecto .....	109
F.5.	Actuaciones para la minimización de los efectos del proyecto .....	110
F.6.	Gestión de los residuos producidos en el proceso .....	110
F.6.1.	Gestión de residuos. Generalidades .....	110
F.6.2.	Gestión de la granalla como chatarra de acero .....	111
F.6.3.	Gestión de paletas de madera.....	111
F.6.4.	Gestión de papel y cartón .....	112
F.6.5.	Gestión de plásticos .....	112
F.7.	Conclusiones del EIA .....	112





## A. Complementos teóricos

### A.1. Otras propiedades del aluminio

Además de las ya especificadas, el trabajo con aluminio puro y sus aleaciones facilita los trabajos de maquinabilidad como por ejemplo el mecanizado consiguiendo tiempos muy cortos de producción debido a las altas velocidades de corte que admiten sus aleaciones.

Su excelente capacidad de conformación hace posible la fabricación mediante extrusión, de perfiles y tubos con secciones transversales completamente arbitrarias. También con casi todos los demás procesos habituales de conformación en frío y en caliente se pueden fabricar, a partir de aleaciones de aluminio, toda clase de productos semielaborados y productos acabados.

Todos los procedimientos de unión se pueden utilizar en los materiales de aluminio. La soldadura por fusión se realiza, la mayoría de las veces, por el procedimiento de electrodo sumergido en gas inerte.

A todos los materiales de aluminio se les puede aplicar la mayoría de los procesos superficiales encaminados a lograr efectos decorativos que confieren además alta resistencia o dureza superficial y resistencia al desgaste.

Los materiales de aluminio no producen chipas, son incombustibles. En las aleaciones de aluminio, no se producen chispas por golpes, siendo incombustibles hasta sus virutas. Dicho aspecto es notable en la preparación de muestras mediante el corte con disco abrasivo, pues a diferencia del acero, sus virutas son combustibles.

Por último, cabe destacar del aluminio y de todas sus aleaciones normalizadas su carácter atóxico (productos esterilizables), su neutralidad magnética (libres de ferromagnetismo) y sus buenas propiedades ópticas (alto poder de reflexión).

### A.2. Procesos y maquinaria de forja

Las aleaciones de aluminio son considerablemente más susceptibles a ser forjadas, particularmente mediante equipos de procesos de forja convencionales, en los que las matrices de forja se calientan a una temperatura de hasta 540°C. Existen aleaciones que su forjabilidad es mucho superior a la convencional pero, en contrapartida, no pueden ser tratadas térmicamente.

La capacidad de forjado de las aleaciones de aluminio se incrementa con la temperatura a la vez que hay una considerable variación en el efecto que ésta tiene según el tipo de aleación. El rango de temperaturas de forjado para la mayoría de las aleaciones es relativamente estrecho entre los 55°C y los 85°C, siendo la temperatura de forjado un factor crítico para el proceso.

Al contrario que en la forja de algunos aceros, en todos los procesos de forja de aleaciones de aluminio se efectúa un calentamiento de la matriz con objeto de facilitar el forjado.

La criticidad de la temperatura de la matriz para la optimización del proceso depende del tipo de equipo que se emplee en la forja, del tipo de aleación a forjar y de la severidad de la deformación o de la complejidad de la pieza a forjar.



Para la obtención de una forja correcta, la lubricación de la matriz es otro de los elementos críticos y objeto de mayor atención desde el punto de vista de la ingeniería de procesos o de desarrollo de lubricantes. Estos, deberán responder a severas condiciones de servicio y ser capaces de modificar la superficie de la matriz para conseguir una reducción de la fricción hasta el nivel deseado soportando las elevadas temperaturas de metal y la matriz, así como las fuertes presiones sin que la maquinaria o la pieza a forjar se vean afectadas. El grafito es el principal elemento activo de los lubricantes empleados para los procesos de forja.

La selección del método óptimo para obtener una determinada geometría se basa en el diseño original de la pieza y en el coste. Los métodos más usuales son los que se citan a continuación.

**Forja en matriz abierta.** Se emplea para la producción de pequeñas series de piezas.

**Forja en matriz cerrada.** La mayoría de piezas forjadas se obtienen mediante este proceso. Los cuatro tipos de forja obtenidos mediante este procesos son de preforma, convencional, de alta definición y de precisión.

**Forja por recalado.** Se emplea normalmente para la fabricación de piezas caracterizadas por superficies de revolución, como tornillos, válvulas, rodamientos, ruedas dentadas y pistones. Este proceso se emplea para la obtención directa de la pieza deseada.

**Forja por laminación.** Puede utilizarse bien como una operación previa o para reducir el número de operaciones posteriores en la forja de matriz cerrada. En este proceso, el metal se conforma a su paso entre dos rodillos giratorios.

**Forja giratoria.** Es una variante de las prensas de matriz cerrada en donde una o todas las matrices se hacen rotar llevando a una deformación progresiva del material. Se emplea para la conformación de piezas con superficies de revolución.

**Forja de revolución.** Es una técnica que combina la forja en matriz cerrada con forja de revolución y es manipulada mediante control numérico para conseguir tolerancias muy ajustadas en cuanto a simetría axial en piezas huecas, mediante forja en frío o en caliente. Necesitan mecanizado posterior al ser acabadas mediante mandril.

**Laminado de anillas.** Este tipo de forja se emplea para la fabricación de formas anulares de sección cuadrada o redondeada susceptible o no de mecanizado. La deformación ocasionada genera una orientación de los granos de material e dirección tangencial o circunferencial.

**Forja por mandril.** Se emplea para genear piezas de simetría axial relativamente simples como anillos o formas cilíndricas. En este proceso el grosor de la preforma se va reduciendo progresivamente al incrementarse el diámetro de la pieza.

**Extrusión inversa.** Se emplea para la fabricación de formas huecas de simetría axial. Este proceso optimiza la extrusión directa en cuanto a fuerzas de fricción y movimiento relativo entre el metal y la prensa.

### A.3. Otras aleaciones de aluminio para forja tratables térmicamente

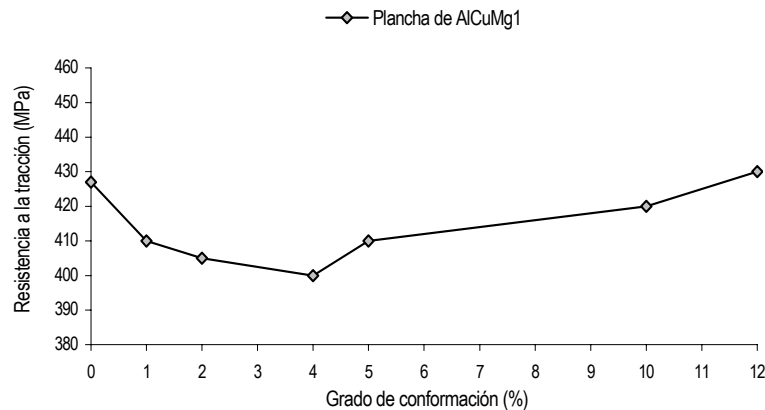
**Aleaciones AlCuMg y aleaciones AlCuSiMn.** Las aleaciones AlCu2.5Mg0.5, AlCuMg2 y AlCuMgPb se templean generalmente en frío debido a que, en el estado endurecido térmicamente, hay que contar con una menor resistencia a la corrosión.



Teniendo en cuenta que estas aleaciones, en particular AlCuMg1 y AlCuMg2, se encuentran aleadas casi en el límite de solubilidad, es necesario realizar el recocido de disolución a la máxima temperatura posible. La limitación de la temperatura de recocido hacia arriba viene condicionada con el punto de fusión de las fases de la aleación de más bajo punto de fusión siendo las temperaturas utilizadas para el tratamiento de 495 a 510°C. Las aleaciones AlCuMg se enfrían habitualmente en agua fría.

El enfriamiento debe realizarse inmediatamente después del recocido de disolución con objeto de evitar una precipitación incontrolada. El intervalo de temperaturas, entre los 250 y los 450°C, debe ser recorrido rápidamente a fin de que no se forme ningún precipitado en los bordes de grano, que provocaría una tendencia a la corrosión intercrisalina.

Durante el endurecimiento, es posible conformar el material durante las dos primera horas después del enfriamiento, como puede ser la realización de un doblado o enderezado. Efectuando un enfriamiento de las piezas dejándolas a 0°C se puede conformar los materiales pasadas las 40 horas después del enfriamiento rápido y mediante un enfriamiento de las mismas a -20°C. Después del enfriado se detiene el endurecimiento pudiéndose conformar pasados hasta los 6 días después del temple. La conformación en frío entre el enfriado y el almacenaje disminuye el efecto de endurecimiento. A continuación se muestra la influencia de la conformación después del enfriado para una aleación de AlCuMg1 la cual presenta un mínimo en la resistencia a la tracción para un grado de estirado del 5% (Fig. A.1.).



**Fig. A.1.** Influencia del grado de conformación después del enfriado en el endurecimiento de la aleación AlCuMg1; temperatura de 500°C para el recocido de disolución; almacenamiento en frío 8 días a temperatura ambiente.

La resistencia a la tracción crece al aumentar el grado de estirado y alcanza, aproximadamente con el 12%, los valores conseguidos en probetas no estiradas. Al aumentar el grado de estirado aumenta constantemente la porción de compactación correspondiente al aumento de la resistencia. Por el contrario, el aumento de resistencia que se consigue mediante el temple al aumentar el grado de estirado desciende primeramente hasta un 5% con bastante intensidad y, pasado el 5%, de manera moderada.

Las aleaciones AlCuSiMn y AlCuBiPb se endurecen tanto en caliente como en frío. La resistencia a la corrosión de estas aleaciones no queda influenciada esencialmente cuando se endurecen térmicamente, de tal manera que nos podemos beneficiar del aumento de la resistencia mecánica conseguida a través del endurecimiento térmico.

Los materiales recubiertos se pueden tratar como los no recubiertos; no obstante, se debe mantener la duración del proceso de endurecimiento tan poco como sea posible, para no reducir la estabilidad química. Cuando se realiza un proceso prolongado, aumenta la cantidad de cobre difundido desde el material base hacia el recubrimiento, lo cual perjudica a la resistencia a la corrosión.



**Aleaciones AlZnMg.** El campo de temperatura usual para el recocido de disolución de aleaciones AlZnMg se halla más bajo que otras para forja y aleación endurecibles sin Zn. La temperatura del recocido de disolución no tiene ninguna influencia notable en el campo de temperatura situado entre 350 y 500°C sobre los valores de resistencia alcanzados en el endurecimiento y se halla, preferentemente, entre 450 y 480°C. Este comportamiento favorable se aprovecha en la industria para realizar, en un solo calentamiento, el recocido de disolución y la conformación en caliente, como es el caso en la fabricación de perfiles extrusionados de AlZn4.5Mg1. Un rasgo esencial de la aleación AlZn4.5Mg1 es la poca sensibilidad al enfriamiento. La velocidad de enfriamiento después del proceso de temple influye muy poco sobre los valores de resistencia obtenidos después del almacenaje.

Se consigue el endurecimiento de la aleación de la aleación AlZn4.5Mg1 después de un enfriamiento al aire, prácticamente con los mismos valores para el límite elástico del 0.2% que cuando se realiza un enfriamiento en agua después del recocido de disolución. La sensibilidad al enfriamiento depende, entre otras variables, de la suma de masas de Zn y Mg y de la relación entre sus masas. La aleación AlZnMg3, que ya no está normalizada, con un mayor contenido en Zn y Mg, alrededor del 30% y con una menor relación entre Zn y Mg, alrededor del 50%, era notablemente más sensible al enfriamiento.

Respecto a la resistencia frente a la corrosión por grietas bajo tensión, es ventajoso según sea el espesor de la pared, un enfriamiento en agua caliente, hasta los 80 °C, o un enfriamiento en aire. La resistencia frente a la corrosión en las grietas producidas por tensiones aumenta, especialmente, por el almacenamiento térmico o escalonado. Un sobreenviejamiento que se consigue aumentando la duración del almacenaje térmico muy por encima de los valores máximos de resistencia mecánica se obtiene una mayor resistencia a la corrosión en las grietas producidas por tensiones pero en contrapartida la resistencia mecánica sufre una disminución considerable. La escasa sensibilidad al enfriamiento y el amplio campo de la temperatura del recocido de disolución hacen que sea posible endurecer de nuevo las zonas sometidas a la influencia del calor durante la soldadura de material endurecido, que se hayan ablandado, sin que para ello sea necesario un nuevo recocido de disolución. La permanencia a temperatura ambiente durante 3 meses tiene como consecuencia que el material endurecido en frío recupere de nuevo las propiedades resistentes. Con objeto de acelerar el endurecimiento, se almacena a temperatura algo superior, por ejemplo 60h a 60°C o 24h a 120°C. El almacenaje de 60h a 60°C da un estado de endurecimiento en frío estable; el almacenaje de 24h a 120°C se haya en el campo del endurecimiento térmico y es muy ventajoso desde el punto de vista de la resistencia frente a la corrosión por grietas bajo tensión y de la corrosión por capas.

Cuando se realizan trabajos de conformación o soldadura, se debe tener en cuenta que el intervalo de temperaturas de 200 a 300°C se recorrerá rápidamente, ya que una permanencia mayor en este intervalo de temperaturas disminuye la capacidad de un nuevo endurecimiento.

El endurecimiento térmico de AlZn4.5Mg1 se favorece, al contrario que la AlMgSi1, mediante un almacenamiento previo a la temperatura ambiente, respecto a los valores resistentes máximos alcanzables. Otra elevación de la resistencia a la tracción y del límite elástico 0.2% se puede provocar por un almacenaje escalonado. Este tratamiento se realiza en la aleación AlZn4.5Mg1, primera temperatura entre 90 y 100°C y luego entre 145 y 155°C.

**Aleaciones AlZnMgCu.** Las aleaciones más importantes de este grupo son AlZnMgCu0.5 y AlZnMgCu1.5. Las temperaturas del recocido de disolución se hayan entre 460°C y 480°C.

La sensibilidad al enfriamiento es mayor que en la AlZn4.5Mg1, a causa de los mayores contenidos de aleación y especialmente de las adiciones de Cu y Cr. Para conseguir un estado de la estructura resistente a la corrosión por grietas bajo tensión y que al mismo tiempo posea elevados valores resistentes, se almacenan estas aleaciones preferentemente con calor o de modo escalonado.





Para conseguir elevada resistencia a la corrosión por grietas bajo tensión es preciso que las aleaciones de AlZnMgCu estén sobreenviejadas. A la primera etapa de almacenaje a 105°C o a 135°C respectivamente de los valores para la resistencia a la tracción y el límite elástico, conseguidos después del almacenaje, se alcanzan después de la segunda, a temperaturas más altas y tras un retroceso inicial de la resistencia a la tracción y el límite elástico, casi los mismos valores máximos de resistencia. Los tiempos necesarios para conseguir valores máximos de resistencia disminuyen a medida que aumentan las temperaturas de almacenaje

**Materiales avanzados para forja de aluminio.** Existen tres grupos de materiales avanzados de aluminio los cuales han estado diseñados para mejorar la capacidad del aluminio en aplicaciones críticas. Estas son básicamente las que se citan a continuación.

*Aleaciones de ALLi.* Estas aleaciones permiten una reducción de peso importante en sus aplicaciones a la vez que la adición de litio aumenta el límite elástico. Son más caras que las aleaciones comerciales, por lo que se suelen forjar mediante procesos de alta definición y precisión para optimizar el empleo de material inicial y minimizar el mecanizado.

*Aleaciones prealeadas creadas mediante pulvimetalurgia.* Estas aleaciones se basan en una rápida solidificación u otro tipo de tecnología de polvos como aleado mecánico el cual efectúa un endurecimiento por dispersión. Según la composición dentro de este grupo, podemos encontrar aleaciones de alta resistencia, para trabajo a elevadas temperaturas o resistentes a la corrosión.

*Materiales compuestos de matriz metálica discontinua.* Estos materiales de base aluminio pueden ser fabricados por metalurgia de polvos o por metalurgia de lingote, donde a la matriz de aleación de aluminio le añaden partículas cerámicas como carburo de silicio o alúmina distribuidas de forma discontinua. La adición de estas partículas modifica sustancialmente las propiedades de la aleación, incrementando su límite elástico, módulo dinámico, resistencia mecánica, resistencia a la abrasión; mejorando su comportamiento a elevadas temperaturas; reduciendo su ductilidad y tenacidad de fractura, y todo ello sin afectar significativamente a la resistencia a la corrosión. Este tipo de compuesto puede ser trabajado mediante cualquier técnica, incluidas la forja y extrusión.

#### **A.4. Aleaciones de aluminio para forja no tratables térmicamente**

Las aleaciones de este grupo únicamente pueden endurecerse por trabajo en frío y el único tratamiento térmico que se les puede someter es un recocido para ablandar el material trabajado en frío llevado a cabo entre los 350 y los 400°C. Las aleaciones de este grupo poseen una buena resistencia a la corrosión y generalmente se clasifican en dos grupos principales.

**Aleación de aluminio con 1.25% de Mn.** El manganeso es parcialmente soluble en aluminio sólido y la aleación con un 1.25% de Mn es significativamente más resistente que el aluminio comercialmente puro y otorga mejor resistencia a la corrosión. Sus usos principales son en forma de chapa para techumbre y revestimiento de edificios y para la producción de edificios y para la producción de utensilios domésticos.

**Aleación de aluminio con contenidos entre el 2 y el 7% de Mg.** El Mg también es parcialmente soluble en aluminio y lo endurece más que el Mn. Las aleaciones AlMg se pueden soldar fácilmente y tienen buena resistencia a la corrosión, especialmente en aplicaciones marinas. Entre otras aplicaciones, dichas aleaciones se utilizan para la fabricación de barriles, vasijas y contenedores.



## A.5. Otras aleaciones de aluminio para colada

**Aleaciones AlCu.** La adición de cobre al aluminio aumenta la colabilidad, disminuye la resistencia a la corrosión y permite aumentar la resistencia mecánica y la dureza mediante tratamientos térmicos de solubilización, temple y envejecido.

Las aleaciones binarias de Al-Cu forman un eutéctico a 547°C a una composición del 33% en cobre. En el eutéctico se tiene en equilibrio una solución sólida de aluminio o fase  $\alpha$  y un intermetálico  $\text{CuAl}_2$  con una estructura cristalina tetragonal centrada.

En el diagrama de equilibrio se observa que a la temperatura del eutéctico la solubilidad del cobre es máxima, 5.7%, y a medida que desciende la temperatura, la solubilidad va disminuyendo hasta valores del 0.45% a 300°C y del 0.1÷0.2% a los 250°C. Esta diferencia de solubilidad es la que permite que estas aleaciones sean susceptibles de ser tratadas térmicamente (Fig. A.2.).

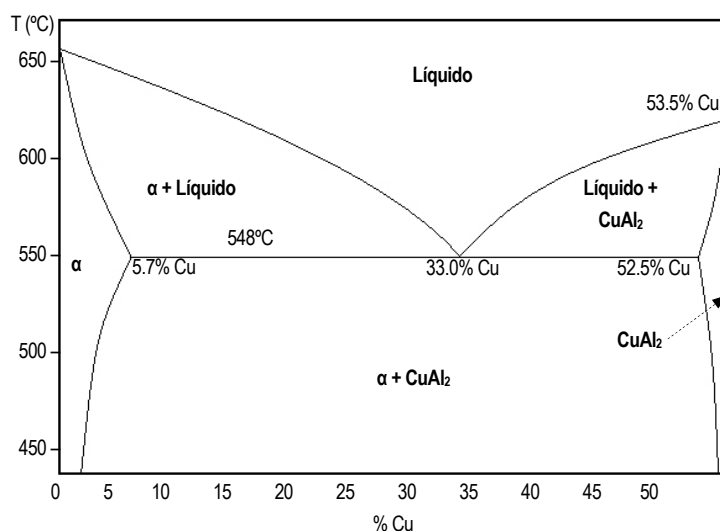


Fig. A.2. Diagrama de equilibrio de fases del sistema binario Al-Cu.

En general, las aleaciones más utilizadas industrialmente son las que presentan una concentración en cobre entre un 4% y un 6%, ya que son las que responden más favorablemente a los tratamientos de endurecimiento.

En aleaciones de colada de aluminio con un 4% en cobre y a temperaturas por encima de la curva de solubilidad, se puede obtener unas microestructuras denominadas celulares como consecuencia de una distribución no homogénea del cobre en la matriz de aluminio. El cobre se redistribuye de una manera compleja concentrándose en unas determinadas zonas. Dicha estructura se puede retener mediante procesos de temple. Mediante procesos de recocido a 150°C, la solución sólida se descompone en una solución sólida más un exceso de cobre en forma de clusters, que son los núcleos para la formación de los precipitados de Guinier-Preston del tipo I en forma de láminas de 5Å de espesor y 100Å de largo.

En la industria de la automoción se utilizan aleaciones AlCu con un mayor contenido en cobre, siendo los valores más utilizados los que comprenden del 9% al 11% en Cu. Esto es debido a que estas aleaciones presentan unas buenas propiedades de moldeo, buena resistencia mecánica a elevadas temperaturas y una buena resistencia al desgaste.



Aleaciones con contenido superior al 14% en Cu no existen comercialmente debido a la fragilidad de estas por el gran porcentaje del intermetálico  $\text{CuAl}_2$  presente en la matriz.

**Aleaciones AlCuSi.** Las aleaciones ternarias AlCuSi suelen contener entre un 2÷5% de Cu y entre un 2÷10% de Si. No obstante, el porcentaje de elementos suele variar según las propiedades deseadas. El Cu contribuye principalmente al aumento de resistencia mecánica, mientras que el Si mejora la colabilidad de la aleación. Cuanto más complejo sea el proceso de colada, mayor es el porcentaje de silicio necesario para la aleación.

Aleaciones hipereutécticas con contenidos de Si mayores al 12% se utilizan para la industria de la automoción en la fabricación de piezas como pistones para motores. Esto es debido a que, para estas concentraciones de silicio, éste se encuentra distribuido en la matriz en forma de cristales de silicio puro que confieren unas excelentes propiedades tribológicas. En este tipo de aleaciones, se encuentran normalmente en las micrografías la fase primaria de Si juntamente con el eutéctico ternario  $\alpha + \text{CuAl}_2 + \text{Si}$ .

**Aleaciones AlMn.** El aluminio forma un eutéctico con el intermetálico  $\text{MnAl}_6$  a la temperatura de 685.5°C y a una composición del 2% de Mn. La solubilidad del Mn en la matriz de aluminio puede llegar hasta 1.82% a la temperatura del eutéctico y como se puede observar en la gráfica, la solubilidad disminuye con la temperatura. Por ejemplo, a 600°C la solubilidad disminuye hasta 0.95% y a 500°C llega al 0.35% (Fig. A.3.). El intermetálico  $\text{MnAl}_6$  tiene un 25.34% en peso de Mn y se presenta con una estructura ortorrómbica. El Mn aumenta la resistencia mecánica tanto si esta en solución sólida o si se presenta formando intermetálicos.

La presencia de Mn aumenta la temperatura de recristalización y previene el crecimiento de grano. En general, este grupo de aleaciones AlMn suelen tener una concentración de hasta un 1.2% en Mn. La presencia de metales como el Fe, Cr u otros metales de transición deben controlarse, ya que de no ser así, pueden precipitar intermetálicos durante la colada. Por ejemplo, en aleaciones como la 3003 AA y la 3004 AA, el contenido en hierro y manganeso no deben superar el 2% y el 1.7% respectivamente para evitar la formación de  $\text{FeAl}_3$  ni  $\text{MnAl}_6$  durante el proceso de colada.

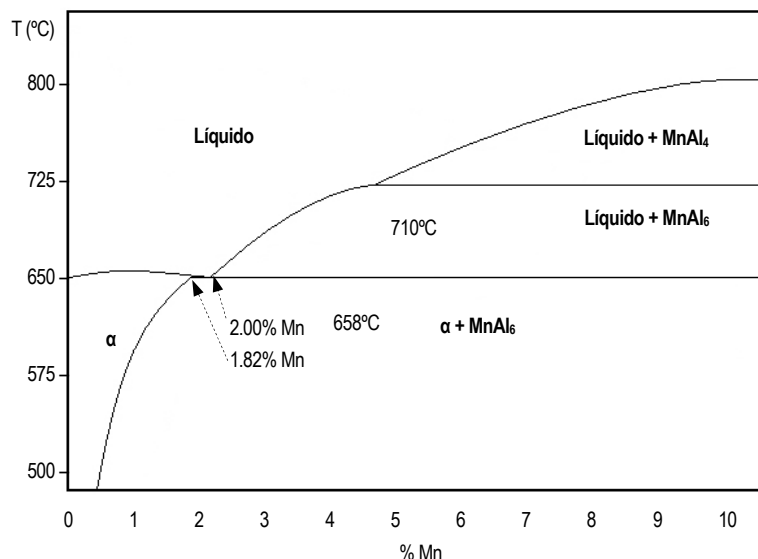


Fig. A.3. Diagrama de equilibrio de fases del sistema binario Al-Mn.



## A.6. Otros tratamientos térmicos de las aleaciones de aluminio

A continuación se detallaran los tratamientos térmicos más utilizados para las aleaciones de aluminio para forja y para colada, haciendo hincapié en las propiedades resultantes de la aleación sometida a los tratamientos en cuestión.

### A.6.1. Recocido de ablandamiento, estabilización

El recocido de ablandamiento sirve para transformar materiales a un estado de resistencia muy baja y alto alargamiento. Se realiza de ordinario para facilitar trabajos de conformación o para hacerlos posibles. En los materiales endurecidos en frío, el recocido de ablandamiento consiste en un recocido de recristalización, habiendo de tenerse en cuenta el tamaño de grano, la duración del recocido, el grado de deformación en frío y los recocidos intermedios.

En los materiales endurecibles, el recocido de ablandamiento sirve para la precipitación amplia de constituyentes de la aleación que se hallen disueltos, sobresaturados, en forma gruesa, o para la transformación de precipitaciones coherentes y parcialmente coherentes en fases incoherentes estables. En las aleaciones de fundición, el recocido entre 350 y 450°C provoca un ablandamiento de las piezas fundidas, en el caso de aleaciones endurecibles o templadas con un enfriamiento lento en el horno o en aire en calma. El tratamiento se utiliza solo en casos ocasionales, en los que se busque un aumento de la capacidad de deformación para una conformación en frío posterior.

Las aleaciones AlMg con más del 4% de Mg deben ser sometidas ocasionalmente a un recocido de estabilización, para conseguir en ellas un estado no sensible a la corrosión intercristalina.

En las piezas fundidas existen procesos de precipitación que van acompañados de una modificación escasa en el volumen y que pueden aparecer por un calentamiento en servicio. Para impedir, que en piezas de precisión se originen variaciones de medida debido a modificaciones volumétricas, se realiza, antes de su mecanizado, un recocido de estabilización de varias horas, a temperaturas entre 200 y 300°C, o a la temperatura de funcionamiento prevista, seguido de un enfriamiento al aire.

### A.6.2. Normalizado

El normalizado sirve para la eliminación de tensiones propias, que pueden surgir debido a un rápido enfriamiento de las piezas al colarlas, por enfriamiento rápido después del proceso de endurecimiento o por trabajo mecánico. Debido a las tensiones propias, pueden producirse deformaciones en las piezas, especialmente cuando se mecanizan con arranque de viruta, que pueden influir negativamente, en especial cuando la exactitud requerida en las medidas es elevada. Las tensiones por enfriamiento se pueden producir mediante un descenso regular de la temperatura durante el enfriamiento, sumergiendo verticalmente las planchas y perfiles en el baño de enfriamiento.

Las temperaturas a aplicar en el normalizado térmico son relativamente bajas (en el campo inferior de la regeneración o más bajas aún, y para piezas coladas de aleaciones no endurecibles, entre 200 y 300°C), ya que de otro modo hay que contar con una merma de la resistencia mecánica no tolerable. En las aleaciones endurecidas térmicamente, las tensiones deberían haber desaparecido durante el tratamiento. De lo contrario no es posible obtener un normalizado sin una disminución clara de la resistencia mecánica. Las piezas endurecidas en frío no pueden normalizarse por un recocido debido a que las temperaturas de recocido situadas por debajo de la temperatura de almacenamiento térmico no son casi nunca activas y los recocidos, a temperaturas más altas, pueden provocar una influencia incontrolada sobre las características. Debe contarse, siempre, en cualquier normalizado por calentamiento, con una merma de las características mecánicas.



El tratamiento de normalizado es tanto más activo cuando más alta es la temperatura y más largo es el tiempo de recocido, aunque deben tenerse en cuenta, al seleccionar las condiciones de recocido, las posibles modificaciones permanentes de las propiedades del material con el resultado consiguiente de aparecer modificaciones no solamente en las propiedades mecánicas, sino, también en la facilidad de mecanizado. El normalizado debe realizarse siempre antes de mecanizar la pieza o al menos antes de la última operación, debido a que está ligada a una deformación permanente. Las piezas no deben enderezarse después. Esto provocaría la aparición de nuevas tensiones.

En piezas menores, como por ejemplo piezas fundidas o forjadas, se efectúa la normalización, ocasionalmente, por un enfriamiento profundo realizado entre  $-80$  y  $-100^{\circ}\text{C}$ , realizándose el recalentamiento a la temperatura ambiente lo más rápidamente posible (enfriamiento inverso). En los semielaborados se puede lograr, también, una normalización, mediante estirado con deformación plástica debiendo contarse con un aumento de la resistencia y un descenso del alargamiento a rotura.

### A.6.3. Recocido total, homogeneización

Los recocidos totales de los productos de fundición (por ejemplo, barras fundidas a presión) se realizan antes de la conformación en caliente según para que fin se destinen. En primer lugar se pretende conseguir una eliminación de las tensiones propias del producto fundido, un equilibrio de los granos segregados y una disolución de los constituyentes estructurales eutécticos en los bordes de grano. No cabe esperar un reajuste de las macrosegregaciones, originadas por segregaciones en bloque inversas, debido a los recorridos de difusión excesivamente largos. Además, el recocido total sirve con frecuencia para conseguir una disgregación regular de elementos disueltos en estado de sobresaturación, especialmente Mn y Fe, que influyen sobre el comportamiento en la recrystalización y en la conformación en caliente. Finalmente, en las aleaciones endurecibles se consigue disolver los elementos que provocan el endurecimiento. Estos se depositan de nuevo, en el siguiente enfriamiento, que no suele ser rápido. Además si se realiza correctamente el proceso, la distribución tiene lugar de modo rápido y total.

El recocido total puede colaborar, por lo tanto, a la disminución de las fuerzas necesarias para la conformación en caliente, a una tendencia hacia el ablandamiento uniforme y recocido de ablandamiento, a disminuir las formas estructurales que puedan producirse en la oxidación anódica y a una mejora de la conformabilidad en frío y de las características mecánicas del producto semielaborado.

Para lograr los efectos deseados se necesitan temperaturas adecuadas, dependientes de la composición, las cuales, en su mayoría, se hallan inmediatamente por debajo de la temperatura de *solidus* de la aleación correspondiente. Teniendo en cuenta que los procesos de difusión no transcurren muy rápidamente a lo largo de los caminos que interesan, se requieren tiempos de parada más largos que, en su mayoría, alcanzan entre 10 y 12h. En algunos casos, en las aleaciones AlZnMgCu, el recocido total se realiza en etapas, recociéndose primero, durante algunas horas, a temperatura un poco más baja, a fin de disolver los eutécticos que eventualmente se hallen presentes y que tienen puntos de fusión bajos. En algunos casos es interesante la velocidad de enfriamiento después del recocido total.

Las aleaciones AlMgSi, especialmente las de fundición a presión del tipo AlMgSi0.5, se enfrían, la mayor parte de las veces con agua o agua nebulizada, a fin de conseguir una estructura favorable. Teniendo en cuenta que en el recocido total se producen, no sólo procesos de equilibrio, sino también, de disolución, la expresión usada a menudo de homogeneización no puede ser aceptada en general. La aleación de fundición G-AlMg10 debe ser homogeneizada para conseguir las características más favorables; en estado de colada es frágil y tiene tendencia a la corrosión en las grietas producidas por las tensiones.



Para equilibrar las fuertes diferencias de concentración se recuecen, a veces, durante 8 a 10h, a temperaturas de 430°C aproximadamente. Las tensiones de enfriamiento que puedan surgir se evitan, después, enfriando en etapas. También se utiliza en la aleación de fundición G-ALSi12 no endurecible un recocido total a 520°C aproximadamente, casi siempre con enfriamiento inmediato, para homogeneizar la estructura y mejorar el alargamiento de rotura y la resistencia a la fatiga.

## A.7. Designación de las aleaciones de aluminio y sus tratamientos

La denominación del término *aluminio* sirve, de modo ordinario y coloquial, como concepto genérico para todos los materiales a base de aluminio, por lo tanto, para el aluminio purísimo, aluminio puro y todas las familias existentes de aleaciones de aluminio.

Es muy habitual en el mundo industrial utilizar la designación de las aleaciones de aluminio por la nomenclatura impuesta por institutos de normalización. Para ello se desarrolla a continuación un resumen de las designaciones de las aleaciones de aluminio para cada una de las familias de aleaciones expuestas en el presente apartado.

El argot industrial utilizado para la designación del aluminio, sus aleaciones y sus estados de tratamiento comprende desde la utilización de las designaciones de las aleaciones y estados de tratamiento según normas españolas (UNE), aleaciones y estados de tratamiento según normas alemanas (DIN), designaciones según normas americanas (ANSI) o internacionales (ISO) y otras designaciones de la *Aluminium Association* (AA) utilizadas muy a menudo.

Es por este motivo que a continuación se hará hincapié en las designaciones utilizadas para las aleaciones de aluminio para forja y colada y sus estados de tratamiento según institutos de normalización diferentes.

### A.7.1. Designación según UNE 38 300, UNE 38 200 y UNE 38 002

**Designación de las aleaciones para forja.** La designación de las aleaciones de forja se recoge en las normas de la serie UNE 38 300. De acuerdo con la norma UNE 38 001 el aluminio y las aleaciones para forja constituyen la serie L-3XXX. Esta serie se clasifica, atendiendo a los principales elementos de aleación, en los grupos siguientes (Tabla A.1.).

Grupo	Aleación
L-30XX	Aluminio
L-31XX	Al-Cu
L-33XX	Al-Mg
L-34XX	Al-Mg-Si
L-35XX	Al-Si
L-36XX	Otras
L-37XX	Al-Zn
L-38XX	Al-Mn
L-39XX	Al-Sn

**Tabla A.1.** Designación de las aleaciones de forja según UNE 38 300.

Para este tipo de aleaciones se adjunta siempre después de la designación UNE correspondiente, el número de aleación equivalente de la *Aluminium Association* (AA).



**Designación de las aleaciones para colada.** La designación de las aleaciones para colada se recoge en las normas de la serie UNE 38 200. De acuerdo con la norma UNE 38 001 el aluminio y las aleaciones para colada constituyen la serie L-2XXX. Esta serie se clasifica, atendiendo a los principales elementos de aleación, en los grupos siguientes (Tabla A.2.).

Grupo	Aleación
L-20XX	Aluminio
L-21XX	Al-Cu
L-23XX	Al-Mg
L-25XX	Al-Si
L-26XX	Al-Si
L-27XX	Al-Zn
L-29XX	Al-Sn

**Tabla A.2.** Designación de las aleaciones para colada según UNE 38 300.

**Designación de los estados de tratamiento.** La norma UNE 38 002 recoge la designación de los estados de tratamiento de todas las aleaciones de aluminio para forja y de las aleaciones de aluminio para colada destinadas a trabajos de forja de la siguiente forma:

*F, bruto de fabricación.* Esta designación se aplica a los productos resultantes de un proceso de conformado el cual no se emplea ningún medio de control particular de las condiciones térmicas o de acritud. Para este estado no existe especificación alguna sobre los límites de características mecánicas.

*O, recocido.* Esta designación se aplica a los productos que son recocidos con objeto de conseguir el estado de menor resistencia mecánica.

*O1, recocido a temperatura elevada y enfriamiento lento.* Esta designación se aplica a los productos forjados que son tratados térmicamente aproximadamente durante el mismo tiempo y a la misma temperatura que los requeridos para un tratamiento de solución, enfriando después lentamente hasta la temperatura ambiente, con objeto de mejorar la respuesta a los ultrasonidos y/o mejorar la estabilidad dimensional. Se aplica a los productos que deben ser mecanizados por parte del usuario con anterioridad al tratamiento de solución. No se especifica para este estado ningún límite para las propiedades mecánicas.

*O2, sometido a tratamiento termomecánico.* Esta designación se aplica a los productos forjados. Sometidos a un tratamiento termomecánico especial. Se aplica a los productos que deben someterse a un conformado superplástico por parte del usuario con anterioridad al tratamiento de solución.

*O3, homogeneizado.* Esta designación se aplica a los alambros y a las bandas de colada continua, que son sometidos a un tratamiento de difusión atómica a alta temperatura a fin de eliminar o de reducir las segregaciones, mejorando consiguientemente la aptitud para la conformación o la respuesta al tratamiento térmico de solución y temple.

*H, acritud.* Esta designación se aplica a los productos sometidos a un proceso de deformación en frío después del recocido, conformación en caliente o la combinación de un proceso de deformación en frío y un recocido parcial o de estabilización, con el fin de obtener las características mecánicas especificadas. La letra H va siempre seguida de, al menos, dos cifras; la primera indica el tipo de proceso termomecánico y la segunda indica el grado de acritud. En ocasiones sigue un tercer dígito el cual indica técnicas especiales de proceso.

A continuación se detalla el estado de tratamiento del primer y segundo dígito que acompaña al estado de acritud H.



*H1X, acritud solamente.* Esta designación se aplica únicamente a los productos que se someten a endurecimiento por deformación plástica en frío a fin de obtener la resistencia mecánica deseada sin tratamiento térmico adicional.

*H2X, acritud y recocido parcial.* Estas designaciones se aplican a los productos que son endurecidos por deformación plástica en frío por encima de lo deseado para ser posteriormente reblandecidos mediante un recocido parcial.

Para las aleaciones que se reblandecen progresivamente a temperatura ambiente, los estados H2X tienen el mismo valor de resistencia a la tracción que los estados H3X correspondientes. Para las otras aleaciones, los estados H2X presentan el mismo valor mínimo de resistencia a la tracción que los estados H1X correspondientes y un alargamiento ligeramente superior.

*H3X, acritud y estabilizado.* Estas designaciones se aplican a los productos que son endurecidos por deformación plástica en frío y cuyas características mecánicas son estabilizadas por tratamiento térmico a baja temperatura o como resultado del calor aportado en el proceso de fabricación. El estabilizado mejora normalmente la ductilidad. Esta designación se aplica sólo a las aleaciones que, de no ser estabilizadas, se reblandecen progresivamente.

*H4X, acritud y lacado o pintado.* Estas designaciones se aplican a los productos que son endurecidos por deformación plástica en frío y que pueden experimentar un cierto recocido parcial en el curso del tratamiento de curado térmico a que se someten después de las operaciones de lacado o pintado.

*Designación del segundo dígito HXX.* El segundo dígito que sigue a la letra H indica el grado final de acritud alcanzado, el cual se identifica por el valor mínimo a la tracción.

- el dígito 8 se atribuye al estado más duro normalmente producido. El valor mínimo de la resistencia a la tracción de los estados HX8 puede determinarse con la ayuda de la tabla siguiente basada en la resistencia a la tracción mínima de la aleación en estado recocido (Tabla A.3.).

Resistencia a la tracción mínima en estado recocido (MPa)	Incremento de la resistencia a la tracción para alcanzar el estado HX8 (MPa)
Hasta 40	55
45 ÷ 60	65
65 ÷ 80	75
85 ÷ 100	85
105 ÷ 120	90
125 ÷ 160	95
165 ÷ 200	100
205 ÷ 240	105
245 ÷ 280	110
285 ÷ 320	115
325 en adelante	120

**Tabla A.3.** Valores de resistencia a la tracción para los estados de tratamiento con designaciones HX8.





- Los estados comprendidos entre el O (recocido) y el HX8 se designan con los dígitos 1 a 7.
- El dígito 4 designa los estados de tratamiento para los que la resistencia a la tracción está aproximadamente entre la del estado O y los estados HX8.
- El dígito 2 designa los estados de tratamiento para los que la resistencia a la tracción está aproximadamente entre la del estado O y la de los estados HX4.
- El dígito 6 designa los estados para los que la resistencia a la tracción está entre la de los estados HX4 y la de los estados HX8.
- Los dígitos 1, 3, 5 y 7 designan los estados intermedios de los definidos anteriormente.
- El dígito 9 designa los estados cuyo valor mínimo de la resistencia a la tracción supera al menos en 10 MPa a la de los estados HX8.
- En el caso de que la resistencia a la tracción de los estados intermedios no acabe por 0 o 5, el valor redondea al primer 0 o al primer 5 inmediatamente superior.

*W, tratamiento térmico de solución y temple.* Esta designación describe un estado inestable. Solamente se aplica a aleaciones que envejecen (o maduran) a temperatura ambiente después del tratamiento de solución y temple. Esta designación solo se especifica cuando la duración del envejecimiento natural que indicada: por ejemplo W3/4h.

*T, tratamiento térmico de endurecimiento estructural.* Dicha designación se aplica a aquellas aleaciones para obtener estados diferentes de los F, O o H. Esta designación se aplica a los productos tratados térmicamente, con o sin acritud suplementaria, para alcanzar un estado estable. El primer dígito después de la T sirve para identificar la secuencia específica de tratamientos básicos. Se atribuyen cifras del 1 al 9 como se explicita a continuación.

*T1, enfriamiento desde la conformación en caliente y maduración natural hasta la obtención de un estado de tratamiento prácticamente estable.* Esta designación se aplica a los productos que no sufren acritud después del enfriamiento desde la temperatura de conformación en caliente, o en los cuales el efecto de acritud asociado al aplanado o al enderezado no tiene influencia en los límites de características mecánicas.

*T2, enfriamiento desde la conformación en caliente, acritud y maduración natural hasta la obtención de un estado de tratamiento prácticamente estable.* Esta designación se aplica a los productos que, después del enfriamiento desde la temperatura de conformación en caliente, reciben una acritud para mejorar su resistencia mecánica, o en los cuales el efecto de acritud asociado al aplanado o al enderezado tiene influencia en los límites de características mecánicas.

*T3, tratamiento de solución, temple, acritud y maduración natural para la obtención de un estado prácticamente estable.* Esta designación se aplica a los productos que, después del tratamiento de solución y temple reciben acritud para mejorar su resistencia mecánica, o en los cuales el efecto de la acritud al aplanamiento o enderezado tiene influencia en los límites de las características mecánicas.

*T4, tratamiento de solución, temple y maduración natural hasta la obtención de un estado prácticamente estable.* Esta designación se aplica a los productos que no sufren acritud después del tratamiento de solución y temple o para los cuales el efecto de la acritud al aplanamiento o enderezado no tiene influencia en los límites de las características mecánicas.



*T5, tratamiento de temple desde la conformación en caliente y maduración artificial.* Esta designación se aplica a los productos que no sufren acritud después del tratamiento de temple desde la temperatura de conformación en caliente, o en los cuales el efecto de la acritud al aplanamiento o enderezado no tiene influencia en los límites de las características mecánicas.

*T6, tratamiento de solución, temple y maduración artificial.* Esta designación se aplica a los productos que no sufren acritud después del tratamiento de solución y temple o para los cuales el efecto de la acritud al aplanamiento o enderezado no tiene influencia en los límites de las características mecánicas.

*T7, tratamiento de solución, temple y sobresaturación/estabilizado.* Esta designación se aplica a los productos sometidos, después de solución y temple, a un tratamiento de maduración artificial que les conduce más allá del punto de resistencia mecánica máxima con objeto de controlar alguna característica significativa distinta de las características mecánicas.

*T8, tratamiento de solución, temple, acritud y maduración artificial.* Esta designación se aplica a los productos sometidos, después de solución y temple, reciben acritud para mejorar su resistencia mecánica, o en los cuales el efecto de la acritud asociada al aplanado o enderezado tiene influencia en los límites de las características mecánicas.

*T9, tratamiento de solución, temple, maduración artificial y acritud.* Esta designación se aplica a los productos sometidos, después de solución y temple, reciben acritud para mejorar su resistencia mecánica, o en los cuales el efecto de la acritud asociada al aplanado o enderezado tiene influencia en los límites de las características mecánicas.

Las definiciones presentes se resumen, a continuación en la tabla siguiente (Tabla A.4.).

Envejecimiento o maduración	Acritud	Enfriamiento desde temperatura de conformación en caliente	Enfriamiento desde temperatura de solución en horno
Natural	No	T1	T4
	Sí	T2	T3
Artificial	No	T5	T6, T7
	Antes de la maduración	-	T7, T8
	Después de la maduración	-	T9

**Tabla A.4.** Resumen de los tratamientos térmicos para las aleaciones de aluminio envejecibles para forja.

## A.7.2. Designación según DIN 1700, DIN 1725 y DIN 17007

**Designación de la composición química.** Para la sistemática de los símbolos abreviados de los materiales no ferrosos, se utiliza la normativa DIN 1700. Los símbolos abreviados normalizados para el aluminio y las aleaciones de aluminio se basan en los datos de pureza mínima y sobre los símbolos químicos de los componentes más importantes, con diversas letras colocadas delante o detrás, junto con números intercalados. Los siguientes símbolos químicos están contenidos en las normas para los componentes de aleación y de adición permisibles (Tabla A.5.).

Ag	Plata	Cr	Cromo	Mn	Manganeso	Ti	Titanio
Al	Aluminio	Co	Cobalto	Na	Sodio	V	Vanadio
B	Boro	Cu	Cobre	Ni	Níquel	Zn	Cinc
Be	Berilio	Fe	Hierro	Pb	Plomo	Zr	Circonio
Bi	Bismuto	Mg	Magnesio	Sn	Estaño	Si	Silicio

**Tabla A.5.** Denominación de los símbolos químicos según DIN 1700.



El símbolo abreviado comienza con *Al* para el metal base aluminio, luego siguen los principales elementos de aleación completados con el tanto por ciento en masa siempre y cuando sea necesario para la diferenciación, por ejemplo: AlMn1, AlMg3, AlMg4.5Mn, AlZnMgCu1.5. Además deberá tenerse en cuenta las variaciones de lo expuesto para el metal puro.

*Aluminio puro.* Al símbolo Al se le añade un número que designa el contenido de aluminio mínimo en porcentaje en masa, por ejemplo: Al99.5.

*Aluminio metalúrgico.* La notación para el aluminio metalúrgico que se suministra en lingotes se diferencia de la del aluminio puro en el semielaborado, por una H colocada a continuación; por ejemplo: Al99.5H.

*Aluminio purísimo.* A la notación se le añade la letra R, por ejemplo: Al99.99R que designa aluminio purísimo en lingotes suministrados por las funde­rías y Al99.98R que designa aluminio purísimo para semielaborados.

Para las aleaciones de aluminio con mayor contenido en aluminio del metal base, se hace constar en la notación, indicando su cantidad, por ejemplo: Al99.9Mg1. Para el aluminio purísimo se escribe solamente a letra R, por ejemplo: AlRMg1.

**Designación según el tipo de elaboración o la forma de suministro.** Las designaciones para el tipo de elaboración se recogen en la norma DIN 1725 parte 2ª. Los materiales para laminación y forja se fabrican por procesos de conformación plástica (laminación, extrusión, estirado, forja) obteniéndose los semielaborados; pertenecen a este grupo el aluminio purísimo, aluminio puro y aleaciones de aluminio; se suministra en su mayor parte en tamaños apropiados partiendo de colada continua. Los materiales de laminación y forja llevan algunas veces letras antepuestas como indicación de uso específico. Se unen éstas mediante un guión con la denominación abreviada peculiar. Estas son las siguientes: *E*- (conductores eléctricos para electrotecnia), *S*- (material de aportación en soldaduras por fusión), *L*- (soldadura), *Sd*- (alambre para metalizar a la llama), *LSd*- (alambre para metalizar al arco eléctrico).

Los materiales para colada se suministran, la mayoría de las veces, en forma de lingotes. Las aleaciones de fundición llevan también letras antepuestas, que indican el proceso de obtención. Estas son: *G*- (lingotes y fundición en arena), *GK*- (fundición en coquilla), *GD*- (fundición a presión), *GZ*- (fundición centrífuga). Son ejemplos de lo expuesto los siguientes: G-AlSi12, GK-AlSi6Cu4.

En las aleaciones de fundición que se permiten mayores adiciones de cobre, siempre que no sea componente de la aleación, se complementa la notación abreviada con el correspondiente símbolo entre paréntesis son ejemplos de los expuesto los siguientes: G-AlSi12 y G-AlSi12(Cu).

Las aleaciones madre se designan por las siguientes letras antepuestas: *V*- (aleación madre), *VR*- (aleación madre con alta pureza). Son ejemplos de lo expuesto los siguientes: V-AlMn10, VR-AlSi20.

**Designación para el estado del material.** El estado del material se designa, en las aleaciones para forja y laminación de aluminio según DIN 1712 parte 3ª y según DIN 1725 parte 1ª, por letras mayúsculas: *W* (recocido de ablandamiento para materiales de laminación y forja no endurecibles y algunos endurecibles), *F* (estado de obtención, compactación en frío o estado de endurecimiento para todos los materiales de laminación y forja), *G* (recocido de reversión partiendo de un estado de alta compactación en frío solamente para materiales de laminación y forja no endurecibles).

A continuación siguen dos dígitos indicativos de la resistencia a la tracción mínima en daN/mm<sup>2</sup> válido únicamente para los estados de utilización; las aleaciones endurecibles llevan la W sin número de resistencia.



Los estados conseguidos por estirado, sin compactación enfrió definida en tubos, varillas y alambres, en los que no se ha fijado una resistencia mecánica mínima, se designan colocando, a continuación, las letras minúsculas *zh* (endurecido por estirado). La designación formada análogamente para láminas y bandas laminadas en frío *wh* (endurecido por laminado).

El estado correspondiente para los materiales de aluminio para moldeo se recoge en DIN 1725 parte 2ª y se designan mediante letras minúsculas colocadas a continuación de la notación DIN. Estas son: *g* (recocido y enfriado), *ho* (homogeneizado), *ka* (endurecido en frío), *wa* (endurecido térmicamente), *ta* (endurecido parcialmente). Son ejemplos de lo expuesto los siguientes: G-AlSi12g, G-AlMg10ho, G-AlSi5Mgka, G-AlSi10Mgwa, G-AlCu4Tita.

**Construcción de los números de material.** La designación numérica de los códigos de material se recoge en la norma DIN 17007 parte 4ª. Dicha norma recoge el modo de numeración basado en un sistema de 5 dígitos con el formato siguiente X.XXXX, el cual se explicita a continuación el significado de cada posición numérica.

*1er dígito.* Número del grupo principal (3).

*2º dígito.* Los números 0 ÷ 5 caracterizan el elemento aleante principal 1 (Cu), 2 (Si), 3 (Mg), 4 (Zn), 0 (Otros o ninguno).

*3er dígito.* Para la tercera cifra, que indica generalmente el elemento de adición que sigue en mayor cantidad, sirve la misma clave, completada como sigue: 5 (Mn), 6 (Pb, Bi, Ca, Cd, Sb, Sn), 7 (Ni, Co), 8 (Ti, B, Be, Zr), 9 (Fe), 0 (Otros elementos).

3.00 AlX	3.01 Al90-98	3.02 Al99	3.03 Al99.9	3.04 Al 99.99	3.05 AlMn	3.06 AlPb	3.07 AlNi	3.08 AlTi	3.09 AlFe
3.10 AlCuX	3.11 AlCu	3.12 AlCuSi	3.13 AlCuMg	3.14 AlCuZn	3.15 AlCuMn	3.16 AlCuPb	3.17 AlCuNi	3.18 AlCuTi	3.19 AlCuFe
3.20 AlSiX	3.21 AlSiCu	3.22 AlSi	3.23 AlSiMg	3.24 AlSiZn	3.25 AlSiMn	3.26 AlSiPb	3.27 AlSiNi	3.28 AlSiTi	3.29 AlSiFe
3.30 AlMgX	3.31 AlMgCu	3.32 AlMgSi	3.33 AlMg	3.34 AlMgZn	3.35 AlMgMn	3.36 AlMgPb	3.37 AlMgNi	3.38 AlMgTi	3.39 AlMgFe
3.40 AlZnX	3.41 AlZnCu	3.42 AlZnSi	3.43 AlZnMg	3.44 AlZn	3.45 AlZnMn	3.46 AlZnPb	3.47 AlZnNi	3.48 AlZnTi	3.49 AlZnFe

**Tabla A.6.** Números de material hasta el 3º dígito según DIN 17007 Parte 4ª.

*4º dígito.* Esta es una cifra indicadora del contenido del elemento aditivo mayoritario. 0 ÷ 2 (contenidos relativamente bajos), 3 ÷ 6 (contenidos medios), 7 ÷ 9 (contenidos relativamente elevados).

*5º dígito.* Esta es la cifra indicativa del método de fabricación. 0 ÷ 3 (aleaciones para moldeo, se reserva el 2 para fundición inyectada), 4 (materiales de aeronáutica), 5 (aleaciones para forja y laminación), 6 y 7 (otras aleaciones para forja y laminación), 8 y 9 (aleaciones para forja y laminación a base de Al99.9 o Al99.9R).

**Designación de los estados de tratamiento.** El estado del material se designa conforme a la norma DIN 17007 parte 4ª por un índice de estado de dos cifras seguido por un punto. Los grupos de cifras 00 a 99 están subdivididos en 9 décadas.

00 ÷ 09. Sin tratar (00 lingote, 01 fundición en arena, 02 fundición en coquilla, 05 fundición a presión, 06 piezas sinterizadas sin tratamiento, 07 laminado en caliente o compactado, 08 prensado, 09 forjado).

10 ÷ 19. Estado blando (10 blando sin dato sobre tamaño de grano, 11÷ 18 blando con dato sobre el tamaño de grano, 19 según prescripciones especiales).



20 ÷ 29. Endurecido en frío de dureza intermedia (20 laminado o estirado, sin valores de resistencia prescritos, 22 un octavo duro, 23 un octavo duro con recocido de inversión, 24 un cuarto duro, 25, un cuarto duro con recocido de inversión, 26 medio duro, 27 medio duro con recocido de inversión, 28 tres cuartos duro, 29 tres cuartos duro con recocido de inversión.)

30 ÷ 39. Endurecido en frío duro.

40 ÷ 49. Recocido de disolución, sin tratamiento mecánico posterior (43 homogeneizado, 44 recocido y enfriado).

50 ÷ 59. Recocido de disolución, tratamiento posterior en frío (51 endurecido en frío y aplanado).

60 ÷ 69. Endurecido térmicamente sin tratamiento mecánico posterior (61, 62 endurecimiento térmico).

70 ÷ 79. Endurecimiento térmico trabajado posteriormente en frío (71, 72 aplanado y endurecido térmicamente).

80 ÷ 89. Distendido, sin compactación en frío previa.

90 ÷ 99. Tratamiento especial.

### A.7.3. Designación según ANSI H35.1

**Designación de las aleaciones para forja.** Las aleaciones de forja se agrupan por un sistema de cuatro dígitos. El significado de estos se detalla a continuación.

*Primer dígito:* el índice 1 corresponde al aluminio puro y los índices de 2 a 8 corresponden al elemento aleante principal que define el grupo, serie o familia de aleaciones.

*Segundo dígito:* en el grupo o familia de aleaciones de la serie 1 esta reservado para identificar las variantes en que ciertas impurezas tienen contenidos controlados. Para el grupo o familia de aleaciones de las series 2 a 8 está reservado para indicar las modificaciones sucesivas que tiene la aleación.

*Dos últimas cifras:* en el grupo o familia 1 indican el porcentaje de aluminio por encima de 99.00%. Para los grupos de aleaciones de las series 2 a 8 sirven únicamente para identificar la aleación. Puede ser que en estas dos cifras aparezcan X en ellas, esto significa que se trata de una aleación experimental. A continuación se muestra un resumen de la correspondencia de las series de aleaciones con su principal elemento aleante (Tabla A.7.).

Serie o familia	Elemento principal
1XXX	Aluminio del 99.00% de pureza como mínimo
2XXX	Cobre (Cu)
3XXX	Manganeso (Mn)
4XXX	Silicio (Si)
5XXX	Magnesio (Mg)
6XXX	Magnesio (Mg) y silicio (Si)
7XXX	Zinc (Zn)
8XXX	Otros elementos
9XXX	Serie no utilizadas

**Tabla A.7.** Designación de las aleaciones de aluminio para forja según normativa ANSI H35.1.



Existe también en el argot comercial e industrial las nomenclaturas de las *Aluminium Association*. En ANSI H35.1. se recogen las designación de la *American National Standards Institute* y la *Aluminium Association*, la cual se rige bajo esta norma para la designación y la composición de las aleaciones registradas en los EEUU.

**Designación de las aleaciones para colada.** Para designar las aleaciones de aluminio para colada se utiliza un sistema de codificación numérico de cuatro dígitos incorporando un decimal, y como en la designación de las aleaciones para forja el primer dígito define la serie, grupo o familia de aleaciones indicando el elemento aleante mayoritario. A continuación se muestra un resumen de la correspondencia de las series de aleaciones con su principal elemento aleante (Tabla A.8.).

Serie o familia	Elemento principal
1XX.X	Aluminio del 99.00% de pureza como mínimo
2XX.X	Cobre (Cu)
3XX.X	Silicio (Si) con adiciones de cobre (Cu) y magnesio (Mg)
4XX.X	Silicio (Si)
5XX.X	Magnesio (Mg)
7XX.X	Zinc (Zn)
8XX.X	Estaño (Sn)
9XX.X	Otros elementos

**Tabla A.8.** Designación de las aleaciones de aluminio para colada según normativa ANSI H35.1.

Para la serie de aleaciones del aluminio puro (1XX.X), dos dígitos siguientes indican el porcentaje superior al 99.00% de aluminio indicando así su grado de pureza. Para el resto de series, los dos dígitos centrales sirven únicamente para identificar las aleaciones de la serie. Por último, el dígito que aparece después del punto indica en que forma se encuentra el producto.

## A.8. Resistencia a la compresión, flexión, corte y torsión

Los valores numéricos de resistencia a la compresión  $\sigma_{dB}$  se determinan en los materiales frágiles sometiéndolos a cargas hasta su rotura. Al límite elástico convencional 0.2%,  $R_{p0.2}$ , del ensayo de tracción, corresponde, en la sollicitación de compresión el límite de aplastamiento 0.2%  $\sigma_{d0.2}$ . En los materiales aluminicos se puede admitir los valores de  $\sigma_{d0.2}$  y  $R_{p0.2}$  como iguales. La resistencia a la compresión o el límite de aplastamiento, respectivamente, 0.2% tienen importancia principalmente en las piezas sometidas a compresión tales como cojinetes de fricción. Experimentalmente se ha comprobado que debajo de las cabezas de tornillos y tuercas se puede admitir la presión superficial hasta casi el límite de aplastamiento 0.2%.

La resistencia a la flexión  $\sigma_{bB}$  tiene, asimismo, importancia solamente en los materiales frágiles. En los materiales de aluminio se realiza el ensayo de flexión, en las aleaciones para fundición, en aquellos casos que, al realizar el ensayo de tracción, no es posible determinar el límite elástico con suficiente exactitud a causa de su pequeño valor. Cuando se parte de la hipótesis, no siempre cierta, de que existe una distribución lineal de las tensiones en toda la sección transversal en el ensayo de flexión, podría considerarse que la resistencia a la flexión es igual a la resistencia a la tracción o compresión, respectivamente, en las fibras externas. La resistencia al cizallamiento  $\tau_{sB}$  es importante para el cálculo de la fuerza necesaria para el corte y para determinadas construcciones. No existen mediciones sistemáticas o valores normalizados.



A continuación puede observarse, para algunos grupos de aleaciones para forja, la comparación de las propiedades descritas con la resistencia a la tracción. Puede verse, de su comparación, que la resistencia al cizallamiento está entre el 55 y el 70% de la resistencia a la tracción y que, al aumentar la resistencia, la resistencia al cizallamiento aumenta más lentamente que la resistencia a la tracción. Para las aleaciones de fundición se utiliza muy poco la resistencia al cizallamiento. Se puede deducir de las escasas mediciones existentes que en este caso la resistencia al cizallamiento puede alcanzar del 5 al 80% de la resistencia a la tracción (Tabla A.9.).

Material	Estado	R <sub>m</sub> (Mpa)	τ <sub>aB</sub> (Mpa)	τ <sub>aB</sub> /R <sub>m</sub>	Material	Estado	R <sub>m</sub> (Mpa)	τ <sub>aB</sub> (Mpa)	τ <sub>aB</sub> /R <sub>m</sub>
Al99,5	W 7	65	45	0,69	AlMg4,5Mn	W 28	290	170	0,59
	F 13	135	75	0,56	AlMgSi0,5	F 13	150	95	0,63
AlMnCu	W 10	110	75	0,68		F 22	230	145	0,63
	F 15	150	95	0,63	AlMgSi1	F 31	340	210	0,62
	F 19	200	110	0,55	AlMgSiPb	F 28	300	195	0,65
AlMn0,5Mg0,5	W11	115	80	0,70	AlCuBiPb	F 32	340	200	0,59
	F 17	175	105	0,60		F 37	390	230	0,59
	F 22	220	120	0,55	AlCuMgPb	F 37	400	260	0,65
AlMn1Mg1	W 16	165	100	0,61	AlCu2,5Mg0,5	F 27	290	190	0,66
	G 26	280	145	0,52	AlCuMg1	W	180	120	0,67
AlMg2,5	W 17	190	120	0,63		F 40	420	260	0,62
	G 23	260	145	0,56	AlCuMg2	W	180	120	0,67
	G 27	290	165	0,57		F 44	460	180	0,39
AlMg5	W 25	290	180	0,62	AlCuSiMn	W	180	120	0,67
AlMg4Mn	W 24	260	160	0,62		F 46	480	290	0,60
	G 30	320	180	0,56	AlZnMgCu1,5	F 53	570	330	0,58

**Tabla A.9.** Comparación entre la resistencia a la tracción y la resistencia al cizallamiento para algunas aleaciones de forja.

## A.9. Resistencia a la fatiga

El fallo por fatiga tiene lugar por las cargas aplicadas en forma variable o repetida. La carga máxima requerida para producir el fallo de esta es mucho menor que la carga de rotura estática.

Muchos componentes y estructuras están sometidos en servicio a cargas variables y si bien los esfuerzos promedios son a menudo bajos, las concentraciones locales de tensiones, que no reducen mucho la resistencia estática, pueden a veces producir el fallo por fatiga. Realmente, el mayor número de fallos en servicio son debidos a la fatiga y relativamente pocos a fallos estáticos.

La característica más notable de los fallos por fatiga es la falta de deformación en la región de las fracturas. Este es uno de los peligros de la fatiga, que no hay ningún indicio de un fallo inminente.

Las grietas producidas por fatiga son generalmente finas y dificultan su detección y una vez que se han desarrollado a tamaño macroscópico pueden difundirse y causar la fractura completa en un tiempo relativamente corto.



Es común encontrar que las grietas de fatiga se originan en alguna discontinuidad superficial. Esto es debido a que cualquier cambio en la sección, como un agujero, un cambio en el diámetro de un eje, una ranura, un chavetero o una muesca producen una concentración de tensiones. La resistencia estática está muy poco afectada por tales cambios de sección, ya que las concentraciones de tensiones se liberan por deformación plástica. Sin embargo, bajo carga de fatiga, hay mucha menos deformación plástica; en consecuencia, el valor del esfuerzo permanece considerablemente más alto en las concentraciones de tensiones que en el material que le circunda, dando una resistencia a la fatiga reducida.

La magnitud del esfuerzo en una concentración de tensiones aumenta con la curvatura de la superficie. En otras palabras, cuanto más pequeño es el radio en un cambio de diámetro de un eje, tanto mayor es la concentración de tensiones. Por lo tanto, en el cálculo de piezas que tienen que resistir esfuerzos dinámicos, es importante determinar la concentración de tensiones en cada cambio de sección y asegurar que se les da un radio adecuado.

Excepto en los pocos casos en que la variación de la carga en servicio es muy pequeña, es muy imprudente basar el proyecto en la resistencia estática y confiarse en un factor de seguridad para protegerse de la fatiga. Este procedimiento, bastante generalizado, conduce al uso de factores de seguridad excesivamente grandes con un consiguiente aumento del peso del componente total. Prestando atención al cálculo y dimensionado en relación a las concentraciones locales de tensiones, el componente puede hacerse más ligero sin incurrir en ningún peligro de fatiga.

Entre los muchos factores que afectan a la resistencia a la fatiga, el más importante es el de las concentraciones locales de tensiones y éste sólo hace el cálculo más difícil que el correspondiente a los esfuerzos estáticos. A la vez, la resistencia a la fatiga depende del tamaño del componente, de la magnitud relativa de las cargas estáticas y fluctuantes y del número de inversiones de la carga. Además, la resistencia a la fatiga está adversamente afectada por la corrosión en un grado mayor que lo está la resistencia estática y particularmente por la corrosión por frotamiento, que es debida a pequeños movimientos repetidos, entre dos partes en contacto.

Las fracturas por fatiga están asociadas usualmente con muchos miles o millones de inversiones de esfuerzos, pero pueden ocurrir y ocurren después de cientos de ciclos en determinadas piezas, tales como muelles.

**Características de las roturas por fatiga.** Si un componente está sometido a cargas de suficiente magnitud, se formará eventualmente alguna grieta o grietas de fatiga en alguna región de tensiones elevadas, corrientemente en la superficie, y progresará gradualmente a través del material hasta producir la fractura total. Las superficies fracturadas de las partes que han sido sometidas a fatiga tienen generalmente un aspecto característico que se les puede reconocer.

Hay dos o tres zonas, que pueden identificarse en cada superficie fracturada. Alrededor de la región de origen de la grieta, la superficie tiene, a menudo, un aspecto liso mostrando señales concoidales; esta es la zona en la que la grieta se ha extendido con relativa lentitud. A veces puede distinguirse una segunda zona menos lisa en que la grieta se ha propagado más rápidamente, quizás en varios lugares a la vez, de modo que la superficie de fractura es irregular. La tercera zona es el área en la cual se produjo la fractura final cuando se redujo la sección y el metal no pudo aguantar la aplicación de la última carga. Esta zona puede tener un aspecto cristalino indicando que la fractura final fue frágil, o un aspecto fibroso indicando una fractura final dúctil.

Si una pieza fracturada se ha sometido a cargas de compresión, puede perderse algún detalle en las superficies fracturadas como resultado de un repetido martilleo de la superficie agrietada antes de que tenga lugar la fractura completa; esta acción produce un aspecto de pulido. Otra característica de las superficies fracturadas por fatiga es la coloración u oxidación de parte de las superficies fracturadas indicando que ha existido una grieta durante algún tiempo.





Estos caracteres distintivos son a menudo usados para identificar fallos por fatiga. Corrientemente hay poca dificultad en los materiales dúctiles, pero en los materiales moldeados, particularmente en la fundición, es a menudo difícil distinguir entre las fracturas estáticas y por fatiga.

**Detección de las grietas por fatiga.** Hay siempre un peligro de fractura por fatiga en las partes sometidas a esfuerzos fluctuantes y es necesario inspeccionarlas si se quieren evitar los fallos. La inspección podría ser más efectiva en los procesos de fatiga si se pudiera percibir el daño en un estado poco avanzado y sería de gran valor disponer de un método para detectar el peligro de fatiga antes de que apareciese la grieta.

Aunque los cambios en ciertas propiedades físicas se pueden detectar en probetas, antes de que ocurriera la grieta, no hay una indicación de un fallo inminente en servicio. Sin embargo hoy es necesario contar con la detección de grietas producidas por fatiga. Esto presenta dificultades prácticas considerables, pues una grieta menor que  $\frac{1}{4}$  de pulgada de longitud no puede detectarse a menos que se sospeche su presencia.

Se dispone de muchos métodos diferentes para la detección de grietas, teniendo en cuenta cada uno de ellos ventajas para aplicaciones particulares. Los métodos más usuales son los magnéticos, los cuales basan su funcionamiento en la distorsión del campo en las proximidades de la grieta; los penetrantes, en los cuales se deposita un líquido rezumado por la grieta y se añade otro líquido fluorescente el cual realza y hace visible la grieta a una inspección ocular; los eléctricos, los cuales permiten, además, la detección de defectos superficiales; y los ultrasónicos, que basan el funcionamiento en la transmisión o reflexión de la onda elástica en el metal.

### A.9.1. Ensayos de fatiga

Para obtener medidas cuantitativas de resistencia a la fatiga, es necesario realizar los ensayos bajo condiciones controladas y, para ello, se dispone de una amplia variedad de máquinas de ensayo de fatiga. Se pueden adoptar diferentes métodos de ensayos de fatiga, desde los ensayos de laboratorio con probetas, bajo las más simples condiciones de esfuerzo, a los ensayos a escala natural de componentes y estructuras bajo condiciones simuladas de lo que ocurre en la práctica.

Los ensayos de laboratorio se usan principalmente para determinar la influencia de la resistencia a la fatiga en factores como elementos de aleación, tratamiento térmico o acabado superficial, ya que los resultados se pueden hacer en probetas lisas o entalladas, a baja o alta temperatura, o bajo condiciones corrosivas. Sin embargo, para obtener datos prácticos, son más significativos los ensayos de fatiga con partes reales. Para este propósito se requieren, algunas veces, instalaciones especiales de ensayo, pero se pueden acomodar y ensayar en máquinas de fatiga normalizadas muchos componentes de pequeño tamaño.

**Nomenclatura.** Durante un ensayo de fatiga, el ciclo de sollicitación se mantiene usualmente constante, así las condiciones de los esfuerzos aplicados pueden escribirse  $\sigma_m \pm \sigma_a$ , donde  $\sigma_m$  es el esfuerzo estático o medio y  $\sigma_a$  es el esfuerzo alternativo, igual a la mitad del intervalo del esfuerzo. Se usa el signo positivo para expresar un esfuerzo de tracción, y el negativo para un esfuerzo de compresión.

A continuación se muestran algunas de las combinaciones posibles de  $\sigma_m$  y  $\sigma_a$  observando que el esfuerzo estático o esfuerzo medio de los ensayos de fatiga corresponde a tensiones tractivas (Fig. A.4.). Cuando  $\sigma_m = 0$  (Fig. A.4. A) el esfuerzo de tracción máximo es igual al de compresión máximo se denomina esfuerzo alternante o inverso. Cuando  $\sigma_m = \sigma_a$  (Fig. A.4. B) el esfuerzo mínimo del ciclo es cero, este es el caso de la tracción o compresión pulsante.

Cualquier otra combinación se conoce como esfuerzo fluctuante que puede ser de tracción (Fig. A.4. C) o compresión fluctuante o puede fluctuar entre un valor de tracción a uno de compresión (Fig. A.4. D).



Las condiciones de los esfuerzos pueden definirse, alternativamente, en términos de los esfuerzos máximo y mínimo en el ciclo,  $\sigma_{\max}$  y  $\sigma_{\min}$ . a la relación algebraica  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$  se le denomina relación de esfuerzos R.

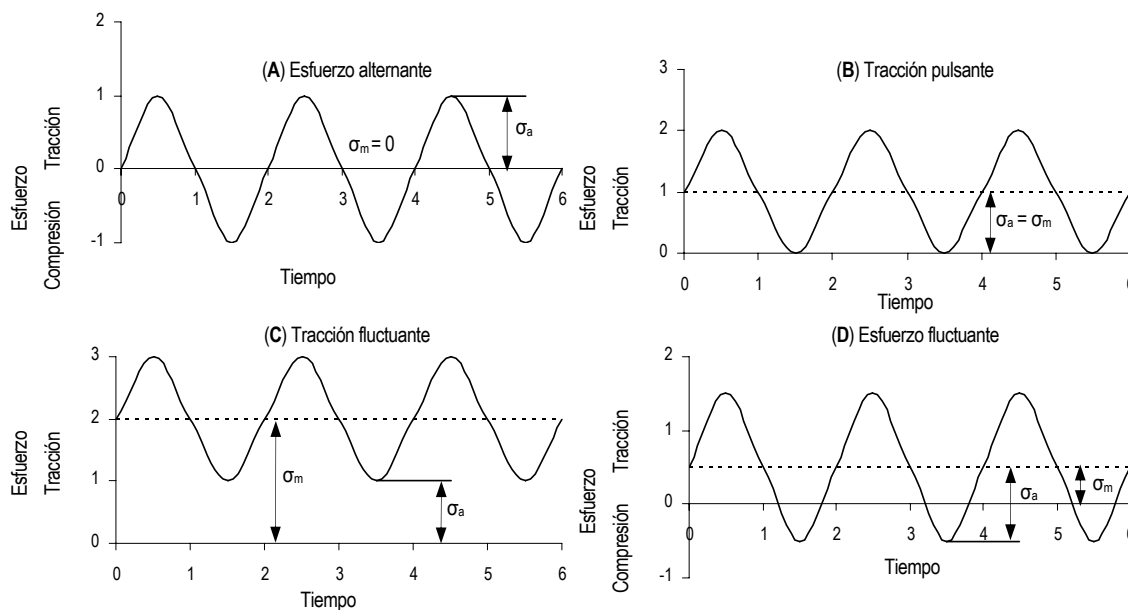


Fig. A.4. Tipos de esfuerzos de fatiga.

Cuando las condiciones de las cargas son tales que los esfuerzos en la probeta no están uniformemente distribuidos, los resultados se presentan, usualmente, en términos del esfuerzo nominal S, que es la sollicitación teórica, sin tener en cuenta sus variaciones en las condiciones producidas por las discontinuidades geométricas.

**Resistencia y límite de fatiga.** El procedimiento para determinar la resistencia a la fatiga es ensayar un número de probetas similares, sometiendo cada una a un valor particular de carga fluctuante o alternante hasta su rotura; así se obtiene una relación entre la carga o esfuerzo fluctuante S y el número de ciclos para la fractura N. A continuación se muestra una curva típica carga resistencia (S-N). N se representa en escala logarítmica, ya que su valor puede variar entre unos millares a muchos millones de ciclos (Fig. A.5.). A continuación se han representado los ensayos a fatiga de probetas cuyo material tiene un comportamiento a fatiga muy distinto.

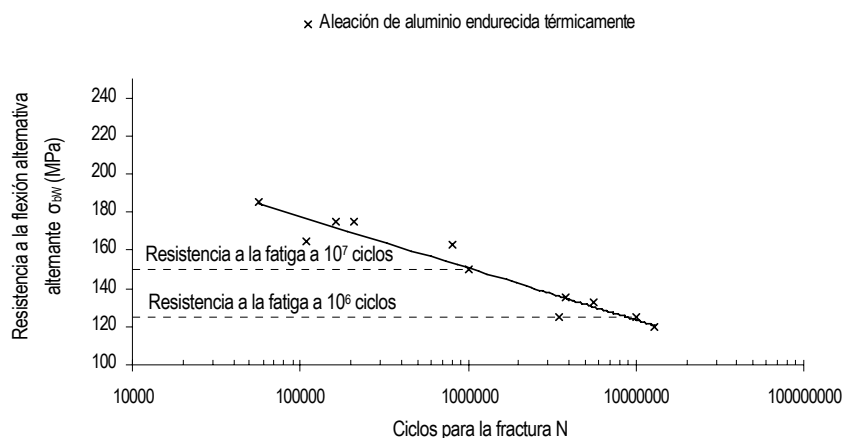


Fig. A.5. Curva S-N para una aleación de aluminio endurecida térmicamente.



Un rasgo característico del comportamiento a fatiga, es la dispersión en los resultados de los ensayos. Parte de la dispersión puede atribuirse a errores experimentales o de preparación del ensayo tales como una mala alineación de la probeta o una determinación inexacta del valor del esfuerzo; pero lo que parece cierto es que la dispersión es una característica inherente del comportamiento de fatiga. Por otra parte, es necesario realizar un gran número de ensayos si se quiere determinar exactamente la curva S-N.

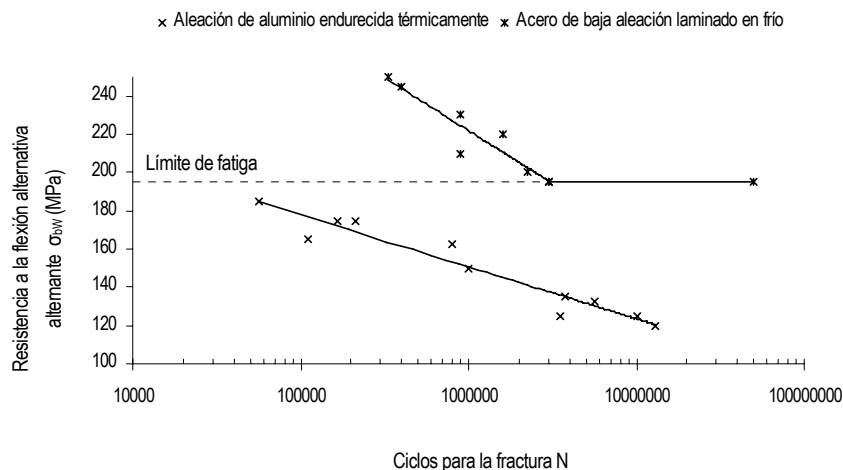
La resistencia a la fatiga se define como el valor máximo del esfuerzo alternante que resistirá sin fallo un material para un determinado número de ciclos. Por lo tanto, la resistencia a la fatiga para el fallo después de  $10^6$  ciclos es igual a 140 MPa y para el fallo después de  $10^7$  ciclos es igual a 120 MPa. Como el valor de la resistencia a la fatiga depende del número de ciclos para el fallo, este número se dará cuando esté determinada la resistencia a la fatiga.

Las curvas S-N, o de Wöhler, están determinadas usualmente en un intervalo de aproximadamente  $10^5$  a  $10^8$  ciclos. Para algunas aplicaciones especiales se utiliza la resistencia a la fatiga para ensayos de menos de  $10^4$  ciclos, pero la curva S-N se investiga pocas veces entre  $N = 1$  y  $N = 10^4$ . Afortunadamente, las curvas S-N tienden a aplanarse en ensayos con alto número de ciclos, así es que se pueden extrapolar con algún grado de confianza.

Hay algunos materiales para los cuales los fallos tienen lugar rara vez después de ensayos mayores de un millón de ciclos, incluso si los ensayos de fatiga se prolongan a  $10^8$  o  $10^9$  ciclos. El diagrama S-N representa una línea inclinada en la cual las probetas no se rompen. La sollicitación a la cual la curva llega a ser horizontal y la carga oscilante se denomina límite de fatiga.

A continuación se muestra las curvas S-N para la aleación de aluminio endurecida térmicamente y para un acero de baja aleación laminado en frío (Fig. A.6.). Esta gráfica muestra los dos caracteres típicos de los ensayos de fatiga; aquellos materiales que no presentan límite de fatiga y los que presentan límite de fatiga el cual indica una vida teórica infinita a la carga oscilante correspondiente con el límite de fatiga.

Los metales que presentan límite de fatiga son, entre otros, el hierro forjado y la fundición, los aceros de baja y media resistencia, los aceros inoxidables, las aleaciones de Al-Mg y algunas aleaciones de titanio.

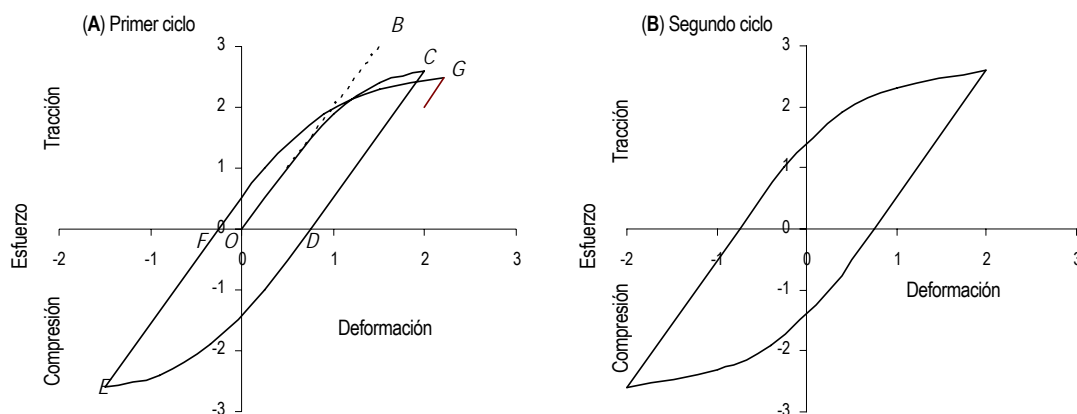


**Fig. A.6.** Comparación de las curvas S-N para una aleación de aluminio endurecida térmicamente, sin límite de fatiga, y para un acero de baja aleación laminado en frío, con límite de fatiga.



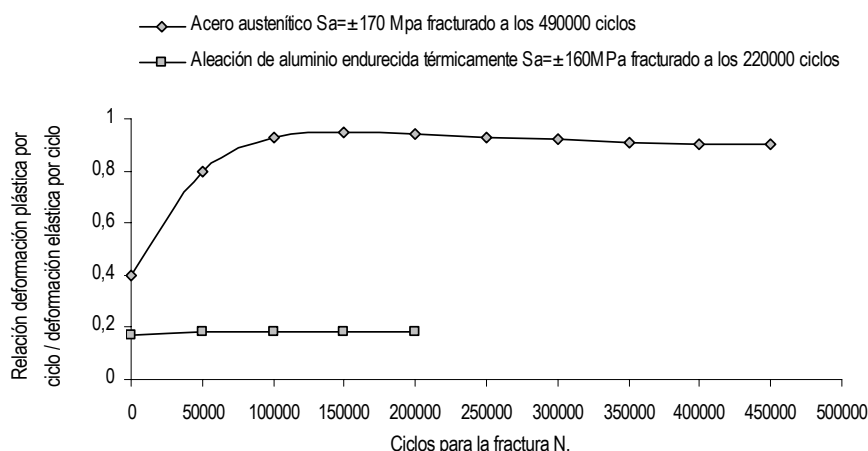
**Relación entre el esfuerzo y deformación durante la fatiga.** Aunque las fracturas por fatiga aparecen normalmente con aspecto frágil, la observación de la deformación durante un ensayo de fatiga muestran a menudo alguna deformación plástica.

A continuación se muestra la relación entre el esfuerzo y deformación aplicando esfuerzos alternantes a la que aparece deformación plástica (Fig. A.7.). En la primera carga en tracción se obtiene una curva de la forma  $OC$  similar a una curva esfuerzo-deformación estática. A bajos esfuerzos la deformación es totalmente elástica y la curva sigue la recta  $OB$  elástica, pero más allá del límite elástico aparece deformación plástica que aumenta con el esfuerzo. En la descarga, la deformación sigue la línea  $CD$ , que para metales a temperatura ambiente es usualmente paralela a la línea  $OB$  elástica. En la carga a compresión, empieza la deformación plástica en el sentido opuesto para un bajo valor del esfuerzo de compresión, dando la curva  $DE$  (la reducción del límite elástico en compresión que resulta de la carga previa a tracción, se conoce como efecto Bauschinger). En la descarga de compresión, se obtiene la línea  $EF$ , paralela a la línea elástica; recargando ahora en tracción da la curva  $FE$ . Si los esfuerzos alternantes son iguales en tracción y compresión, la deformación por tracción será compensada por la de compresión y se obtendrá después de pocos ciclos de esfuerzos una figura cerrada o ciclo conocido como ciclo de histéresis. La deformación durante un ciclo de esfuerzos es igual a la suma de las deformaciones elástica y plástica. Suponiendo que las líneas de descarga  $CD$  y  $EF$  son paralelas a la línea elástica, la anchura del ciclo de histéresis es igual a la deformación plástica.



**Fig. A.7.** Ciclos de histéresis esfuerzo-deformación.

Durante un ensayo de fatiga, en esfuerzo cortante, la deformación plástica en cada ciclo puede variar, durante el curso del ensayo para diferentes materiales (Fig. A.8.).



**Fig. A.8.** Variación de la deformación plástica por ciclo para un acero austenítico y para una aleación de aluminio endurecible térmicamente.



## B. Complementos para la fabricación de la estructura

### B.1. Planos y esquemas de las geometrías de la estructura

A continuación se adjuntan en las próximas páginas los planos referentes a la fabricación de la estructura y al ensamble mediante unión soldada.

Los planos han sido realizados para las piezas que componen la estructura. Estas son las siguientes (Tabla B.1.).

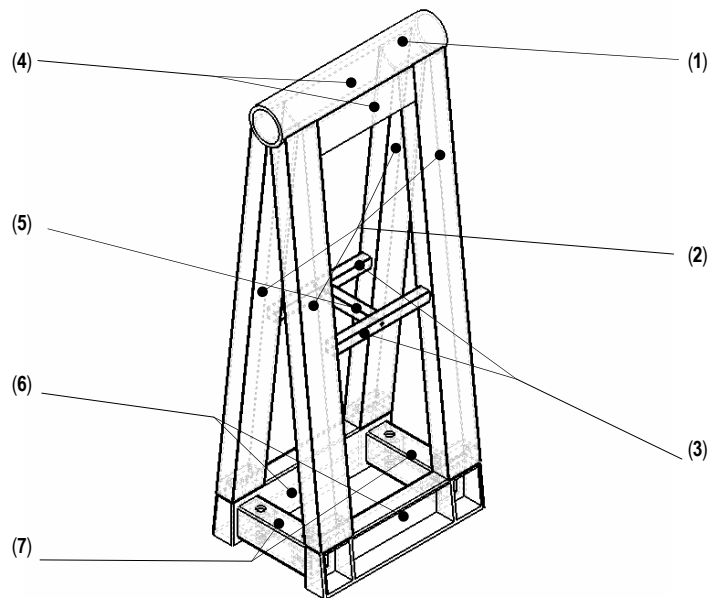


Fig. B.1. Estructura cerrada de aluminio mediante unión soldada objeto de estudio.

Pieza	Denominación	Obtención	Material	Estado de tratamiento
1	Tubo	Forja en caliente (extrusión)	L-3453	T6
2	Perfil lateral	Forja en caliente (extrusión)	L-3453	T4
3	Travesaño unión perfiles	Forja en caliente (extrusión)	L-3453	T4
4	Cartela refuerzo	Laminación en caliente	L-3453	T6
5	Travesaño central	Forja en caliente (extrusión)	L-3453	T4
6	Lateral	Moldeo en arena	L-2653	T6
7	Travesaño unión laterales	Forja en caliente (extrusión)	L-3453	T6

Tabla. B.1. Denominación de los materiales utilizados para la fabricación de la estructura cerrada.























## B.2. Elección del material de aportación para soldadura

Los procesos que tienen lugar en la solidificación de un fundido exigen un material de aportación, que ha de ser adecuado no sólo con vistas a la resistencia mecánica y a la buena fluidez, sino también, a la solidificación del material fundamental y evitar el peligro de que surjan grietas por contracciones. La elección del material de aportación es precisamente importante en los procedimientos de soldadura con gas protector, que trabajan con elevadas velocidades de soldadura, en los cuales el fundido se solidifica mucho más rápidamente. Se suelen distinguir, en los materiales básicos tres tipos diferentes de solidificación:

- Sin formación de eutéctico en los límites de grano (metales no aleados).
- Con pequeña participación del eutéctico en los límites de grano (pequeño contenido en los límites de grano).
- Con cantidad suficiente de eutéctico en los límites de grano.

Las investigaciones sobre la propensión a la formación de grietas en las aleaciones de aluminio han demostrado que la máxima tendencia se presenta para los contenidos en componentes de aleación que son habituales en las aleaciones de aluminio endurecibles. Por estas razones las aleaciones endurecibles de aluminio se sueldan utilizando un aditivo de mayor nivel de aleación. Se debe, sin embargo, contar con el límite conveniente de que estos aditivos no son endurecibles. Tales aleaciones no se pueden soldar por fusión sin aditivo.

Material de aportación	Máxima sensibilidad a la formación de grietas	Contenido mínimo práctico útil	Intervalo crítico de temperaturas
AlSi	0,75% Si	2% Si	660 ÷ 577°C
AlCu	3%Cu	5% Cu	660 ÷ 547°C
AlMg	1,2% Mg	3,5% Mg	660 ÷ 449°C
AlSiMg	0,5% Si, 0,3% Mg	2% Si 3,5% Mg	
	0,5 ÷ 0,8% Si		
	0,2 ÷ 1,2% Mg		

**Tabla B.2.** Tendencia a la formación de grietas con diversos constituyentes de aleación.

En la soldadura de aleaciones del tipo AlMgSi se pueden presentar fusiones en los límites de grano, en el dominio de la zona afectada térmicamente (ZAT) que pueden conducir a separaciones en la solidificación, con sollicitaciones a tracción, en especial en aquellos casos en que la temperatura de *solidus* del eutéctico de límites de grano es inferior a la del material de aportación y cuando éste último fluye viscoso.

Las investigaciones en soldadura demuestran que en aleaciones AlMgSi1 dan como resultado de utilizar el material de aportación AlSi5, de buena fluencia y rápida capacidad de difusión, la no aparición de grietas en este material base, pero sí al utilizar AlMg5Mn como metal de aportación el cual, indudablemente, proporciona una mayor resistencia mecánica en la costura, pero no se difunde en la ZAT y, por consiguiente, no tiene ninguna influencia sobre el comportamiento para la formación de grietas térmicas en las fusiones en los límites de grano en el dominio de la ZAT.

Para la soldadura de aleaciones del tipo AlZnMg, en las cuales el dominio de la temperatura de recocido de disolución y de la velocidad crítica de enfriamiento es tan baja que se produce un endurecimiento a causa del calor de la soldadura y del enfriamiento al aire, se han desarrollado materiales de aportación para soldadura autoendurecibles, del tipo AlMgZn.



Sin embargo la utilización de tales aditivos es cuestionable, puesto que en aquellas zonas de la costura que presentan protuberancias no eliminadas se presenta siempre la rotura en la ZAT.

A continuación se presenta la relación de materiales de aportación adecuados para la unión entre diferentes aleaciones para forja (Tabla B.3.) y la idoneidad de estos en la unión entre grupos principales de aleaciones de moldeo y forja (Tabla B.4.).

Al99,9 Al99,8 Al99,7	AlAl99,8								
Al99,5 Al99	S-Al99,5 S-Al99,5Ti	S-Al99,5 S-Al99,5Ti							
AlMn	S-Al99,5Ti S-AlMn	S-Al99,5Ti S-AlMn	S-AlMn S-AlSi5						
AlMg1 AlMg2Mn0,3 AlMg3	S-AlMg5 <sup>(1)</sup>	S-AlMg5 <sup>(1)</sup>	S-AlMg5 <sup>(1)</sup>	S-AlMg3 S-AlMg5					
AlMg4,5Mn AlMg5	S-AlMg5 <sup>(1)</sup>	S-AlMg5 <sup>(1)</sup>	S-AlMg5 <sup>(1)</sup>	S-AlMg5 S-AlMg4,5Mn	S-AlMg5 S-AlMg4,5Mn				
AlMg2Mn0,8	S-AlMg5 <sup>(1)</sup>	S-AlMg5 <sup>(1)</sup>	S-AlMg5 <sup>(1)</sup>	S-AlMg3 S-AlMg5 S-AlMg4,5Mn	S-AlMg5 S-AlMg4,5Mn	S-AlMg4,5Mn S-AlMg5 S-AlMg3			
AlMgSi0,5 AlMgSi1 AlMgSi0,7	S-AlSi5	S-AlSi5	S-AlSi5	S-AlMg3 <sup>(2)</sup> S-AlMg5	S-AlMg5 S-AlMg4,5Mn	S-AlMg5 S-AlMg4,5Mn	S-AlSi5 S-AlMg3 <sup>(2)</sup> S-AlMg5 <sup>(2)</sup>		
AlZn4,5Mn1	S-AlSi5	S-AlSi5	S-AlSi5	S-AlMg4,5Mn S-AlMg5	S-AlMg4,5Mn S-AlMg5	S-AlMg4,5Mn S-AlMg5	S-AlMg4,5Mn S-AlSi5 AlMg5	S-AlMg4,5Mn S-AlMg5	
	Al99,9 Al99,8 Al99,7	Al99,5 Al99	AlMn	AlMg1 AlMg2 AlMg3	AlMg4,5Mn AlMg5	AlMg2Mn0,8	AlMgSi0,5 AlMgSi1 AlMgSi0,7	AlZn4,5Mn1	

**Tabla B.3.** Relación de materiales de aportación para la unión entre materiales base A (columna izquierda) y materiales base B (fila inferior) para forja y laminación. <sup>(1)</sup> No se recomienda la combinación de materiales; es posible también la soldadura TIG con el material de aportación indicado. <sup>(2)</sup> Para anodizado decorativo posterior.

Aleaciones de fundición (Tipos)	G-AlSi G-AlSiCu G-AlSiMg <sup>(1)</sup>	G-AlMg	G-AlCuTi(Mg) <sup>(2)</sup>	G-AlZnMg G-AlZnSiMg S-AlMg5
Materiales de aportación	S-AlSi12 S-AlSi5	S-AlMg5	S-AlSi5 (S-AlMg5)	S-AlSi5 S-AlSi12

**Tabla B.4.** Relación de materiales de aportación para la unión entre materiales base tipo para moldeo (fila superior) y materiales de aportación (fila inferior).

Por lo tanto, para las aleaciones L-2653 y L-3453, el material de aportación S-AlSi5 será el utilizado para las uniones de las aleaciones presentes en la estructura.



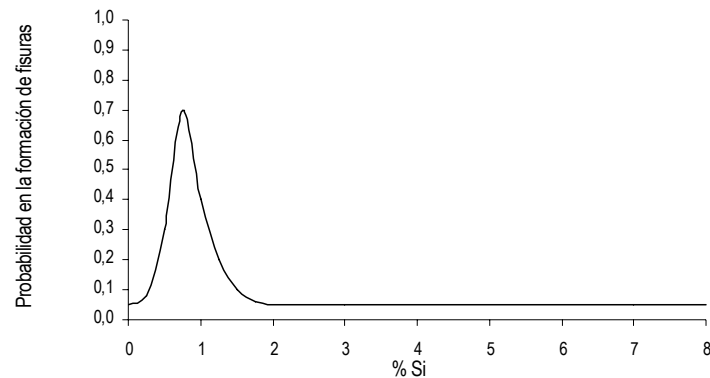


A continuación se muestra la composición química del material de aportación S-ALSi5 (Tabla B.4.).

	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mn (%)	Cr (%)	Zn (%)	Ti (%)	Otras adiciones (%)	Total adiciones (%)
<b>S-ALSi5</b>	4,5 ÷ 5,5	0,4	0,05	0,1	0,1	0,1	0,2	0,25 <sup>(1)</sup>	0,05	0,15

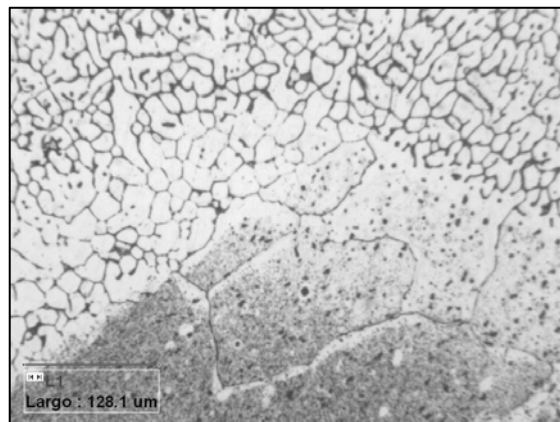
**Tabla B.5.** Composición química del material de aportación para soldadura S-ALSi5 (3.2245 s/DIN). <sup>(1)</sup> el Ti se puede sustituir total o parcialmente por otros aditivos afinadores del grano.

Para el material de aportación S-ALSi5 se adjunta a continuación la sensibilidad a la creación de fisuras durante el proceso de solidificación (Tabla B.5.). Para un contenido del 5% en Si, la afinidad a la creación de grietas es la mínima para la familia de materiales de aportación del sistema binario Al-Si.



**Fig. B.2.** Afinidad a la formación de fisuras durante el proceso de solidificación para el sistema de aleaciones binario Al-Si. Criticidad en el tramo comprendido entre el 0.25 y 1.75. Máxima afinidad a la creación de fisuras para un contenido del 0.75% de Si.

Para el material escogido, el S-ALSi5, se adjunta a continuación una micrografía que evidencia la participación notable del Si eutéctico del material de aportación en la zona de transición estructural de la ZAT en forma de ramales que muestran la buena penetración de la unión soldada.



**Fig. B.3.** Micrografía de la unión soldada entre la aleación L-3453 T6 (abajo) y el material de aportación S-ALSi5 (arriba). Penetración ramificada del Si eutéctico interdentritico en el material base. Soldadura de correcta ejecución. HF 0.5%



### B.3. Tecnología aplicada para los trabajos de soldadura. Soldadura MIG

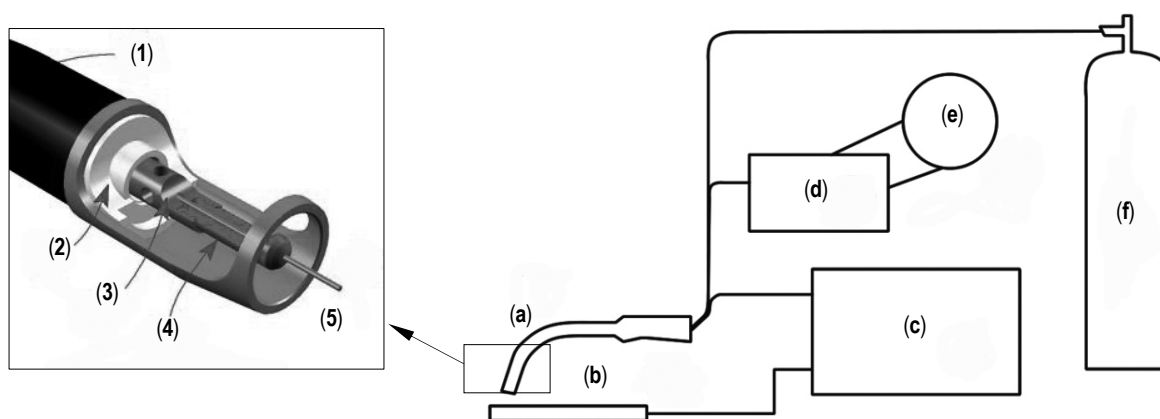
De las tecnologías disponibles actualmente para la unión por fusión del aluminio se ha escogido las técnicas de soldadura por fusión por arco eléctrico bajo gas protector MIG con unión mediante la aportación del material S-AlSi5 (ver Anexo B.2.).

#### B.3.1. Soldadura MIG con corriente continua

El arco eléctrico se inflama entre la pieza y el electrodo de alambre fundente (electrodo metálico), que actúa al mismo tiempo como material de aportación. La soldadura MIG sin material de aportación no es, por lo tanto, posible. La soldadura MIG del aluminio se realiza con corriente continua y electrodo polarizado positivamente.

El transito de material se realiza en forma de gotas finas, con el llamado arco difuso bajo una capa de atmósfera protectora de gases inertes (normalmente una mezcla Ar-He). La soldadura MIG mecanizada no ofrece problemas y está encontrando cada vez más aplicaciones.

La instalación consta de un transformador de continua o rectificador, el soplete de soldadura MIG refrigerado por agua con regulador de presión y sistema dosificador, instrumento de mando para el gas protector y la corriente, la instalación de avance para el alambre, el cable de soldadura y los tubos de goma para el gas y el agua (Fig. B.4.).



**Fig. B.4.** Esquema de los componentes básicos de los equipos de soldadura MIG. (a): antorcha de soldadura; (b): pieza a soldar; (c): fuente de alimentación; (d): sistema de alimentación de material de aportación; (e): bobina de material de aportación para alimentación continua; (f): gas protector inerte Ar-He; (1): cuerpo de la antorcha; (2): orificios salida gas protector; (3): vástago del soporte de aportación; (4): alma del vástago de aportación; (5): material de aportación.

La fusión de un electrodo metálico se realiza con la fusión simultánea del material base (lecho de fusión) de tal manera que, al mover el arco eléctrico sobre el extremo del electrodo y la pieza se forma en el electrodo una gota estrangulada (efecto Pinch) que, al sobrepasar una intensidad de corriente específica determinada en la zona de estrangulación, por evaporación del puente de corriente es lanzada al lecho de fusión (Fig. B.5.).

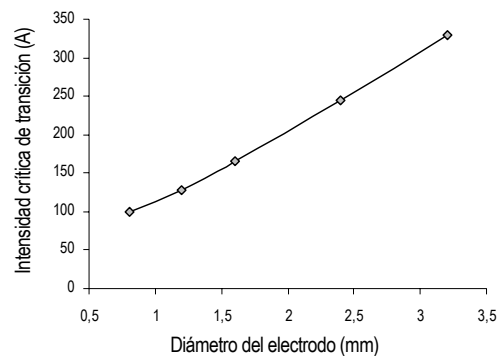
Si la densidad de corriente en el electrodo metálico sobrepasa un valor determinado, que depende del material del electrodo metálico así como del gas protector y de su conductividad, el extremo del electrodo se calienta más y, en consecuencia se vuelve, más fluido, de manera que, debido al efecto Pinch, se produce un adelgazamiento caliciforme del extremo del electrodo.



La defectología propia del proceso se resume a continuación exponiendo las causas posibles que las generan (Tabla B.4.).

	El arco eléctrico no se enciende	Longitud del arco variable	Agarrotamiento del electrodo en el tubo	Superficie de la costura gris oscuro a negro	Perturbación en la atmósfera protectora	Penetración defectuosa	Baño fundido pasante
Polarización incorrecta de los electrodos	•			•			
Interrupción del circuito de corriente	•						
Avería en el sistema de alimentación de alambre	•	•	•				
Fallos en el tubo de contacto		•					
Dobleces en los electrodos de alambre		•					
Sistema de tubos doblado en exceso		•					
Insuficiente refrigeración del soplete			•				
Perturbación en la atmósfera protectora				•			
Posición incorrecta del electrodo				•			
Arco eléctrico de longitud inadecuada				•		•	•
Suciedad flancos costura				•			
Conducción de agua en el soplete no estanca				•			
Conducción gas protector no estanca				•			
Flujo insuficiente de gas protector					•		
Tamaño de la boquilla inadecuado o deformado					•		
Turbulencia debida a la suciedad en la boquilla					•		
Salpicaduras de soldadura en boquilla		•			•		
Tubo de contacto descentrado					•		
Soplete con demasiada inclinación					•		
Forma de la ranura mal hecha						•	
Corriente de soldadura baja						•	
Corriente de soldadura elevada							•
Velocidad de soldadura baja							•
Velocidad de soldadura elevada						•	
Distancia entre almas excesiva							•

**Tabla B.6.** Defectología propia de los trabajos de soldadura mediante tecnología MIG.



**Fig. B.5.** Intensidades críticas para los diferentes diámetros de los electrodos o varillas de aportación.



## B.4. Análisis químico sobre producto

El anexo presente recoge las mediciones realizadas sobre los semielaborados del Anexo B.1. para la comprobación de las aleaciones servidas con el espectrómetro de masas *Spectro MAXx*.

A continuación se muestran las mediciones efectuadas (Tablas B.7. y B.8.).

Medición	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Cr	% Ni	% Zn	% Ti
1	6,9300	0,1310	0,0740	0,0036	0,1930	<0,0005	<0,0010	<0,0010	0,4480
2	7,1100	0,1420	0,0800	0,0037	0,1990	0,0005	<0,0010	<0,0010	0,4880
3	7,0400	0,1430	0,0810	0,0036	0,2350	<0,0005	<0,0010	<0,0010	0,4380
4	6,9400	0,1330	0,0760	0,0035	0,2090	<0,0005	<0,0010	0,0031	0,6100
5	6,7400	0,1410	0,0800	0,0040	0,2180	<0,0005	<0,0010	0,0032	0,5900
6	7,1100	0,1520	0,0790	0,0036	0,1900	0,0034	<0,0010	<0,0010	0,4760

Medición	% Ag	% B	% Be	% Bi	% Ca	% Cd	% Co	% Li	% Na
1	<0,0001	0,0029	<0,0001	<0,0010	0,0007	0,0002	<0,0010	<0,0002	0,0010
2	<0,0001	0,0039	<0,0001	<0,0010	0,0008	0,0002	<0,0010	<0,0002	0,0011
3	<0,0001	0,0034	<0,0001	<0,0010	0,0008	<0,0001	<0,0010	<0,0002	0,0014
4	<0,0001	0,0048	<0,0001	<0,0010	0,0007	0,0002	<0,0010	<0,0002	0,0011
5	<0,0001	0,0050	<0,0001	<0,0010	0,0008	0,0006	<0,0010	<0,0002	0,0012
6	<0,0001	0,0038	<0,0001	<0,0010	0,0012	0,0003	<0,0010	<0,0002	0,0016

Medición	% P	% Pb	% Sn	% Sr	% V	% Zr	% Al
1	<0,0010	0,0014	0,0026	0,0190	0,0082	<0,0003	92,2000
2	<0,0010	0,0015	0,0028	0,0210	0,0084	<0,0003	91,9000
3	<0,0010	0,0012	0,0023	0,0240	0,0080	<0,0003	92,0000
4	<0,0010	0,0018	0,0029	0,0210	0,0080	<0,0003	92,0000
5	<0,0010	0,0018	0,0032	0,0240	0,0086	<0,0003	92,2000
6	<0,0010	0,0015	0,0029	0,0210	0,0079	0,0010	91,9000

**Tabla B.7.** Composición química de los semielaborados servidos de aleación L-2653.



Medición	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Cr	% Ni	% Zn	% Ti
1	0,8300	0,2860	0,0930	0,5500	0,5800	0,0760	0,0014	0,0560	0,0200
2	0,8100	0,2860	0,0920	0,5500	0,5900	0,0760	0,0012	0,0570	0,0200
3	0,8000	0,2830	0,0920	0,5500	0,5900	0,0760	0,0014	0,0580	0,0210
4	0,8100	0,2850	0,0930	0,5500	0,5900	0,0750	0,0012	0,0580	0,0200
5	0,8000	0,2830	0,0910	0,5500	0,5800	0,0750	<0,0010	0,0570	0,0200
6	0,8000	0,2830	0,0910	0,5500	0,5900	0,0750	0,0011	0,0580	0,0210

Medición	% Ag	% B	% Be	% Bi	% Ca	% Cd	% Co	% Li	% Na
1	<0,0001	0,0024	0,0001	<0,0010	0,0029	<0,0001	<0,0010	<0,0002	0,0004
2	<0,0001	0,0023	0,0001	<0,0010	0,0029	0,0002	<0,0010	<0,0002	0,0007
3	<0,0001	0,0023	0,0001	<0,0010	0,0028	0,0003	<0,0010	<0,0002	0,0001
4	<0,0001	0,0023	0,0001	<0,0010	0,0028	0,0004	<0,0010	<0,0002	0,0002
5	<0,0001	0,0023	0,0001	<0,0010	0,0028	0,0002	<0,0010	<0,0002	0,0001
6	<0,0001	0,0023	0,0001	<0,0010	0,0028	0,0004	<0,0010	<0,0002	0,0002

Medición	% P	% Pb	% Sn	% Sr	% V	% Zr	% Al
1	<0,0010	0,0053	0,0022	<0,0001	0,0079	0,0026	97,5000
2	<0,0010	0,0052	0,0026	<0,0001	0,0077	0,0026	97,5000
3	<0,0010	0,0052	0,0023	<0,0001	0,0078	0,0025	97,5000
4	<0,0010	0,0053	0,0021	<0,0001	0,0077	0,0024	97,5000
5	<0,0010	0,0051	0,0029	<0,0001	0,0076	0,0023	97,5000
6	<0,0010	0,0053	0,0025	<0,0001	0,0077	0,0025	97,5000

**Tabla B.8.** Composición química de los semielaborados servidos de aleación L-3453.





## C. Preparación de muestras

### C.1. Montaje de muestras. Probetas metalográficas

A continuación se describe la metodología seguida para la preparación de las probetas metalográficas elaboradas durante el desarrollo del estudio.

**Seccionado de la muestra a evaluar.** De la observación de la región que se pretende efectuar una evaluación microscópica se proceder a seccionar iterativamente las muestras.

- Cortes con sierra vertical de cinta.
- Cortes de precisión iterativos con tronzadora de disco abrasivo para reducir la muestra al tamaño de montaje.
- Si el tamaño de la muestra a evaluar es demasiado pequeño se contempla la utilización de la microcortadora con diamante en el filo de corte.

**Montaje de muestras.** Para el montaje de la muestra seccionada hasta el tamaño de montaje se procede como sigue a continuación:

- Introducción de la muestra apoyando el plano de observación microscópica sobre el pistón de la prensa y se hace descender el embolo una vez ha sido introducida la muestra a examinar.
- Introducción de la cantidad establecida de resina fenólica.
- Cierre de la tapa de la prensa.
- Accionamiento del émbolo para la compresión de la resina fenólica y accionamiento de la fuente de calor para la polimerización de la resina.
- Refrigeración de las muestras montadas.

**Pulido de las probetas montadas.** Para el pulido de la muestra montada se procede como sigue a continuación:

- Introducción de las probetas en el plato de fijación de éstas.
- Pulido de desbaste con disco de carburo de silicio de grano 180.
- Pulido de desbaste con disco de carburo de silicio de grano 320.
- Pulido fino con disco de carburo de silicio de grano 600.
- Pulido fino con disco de carburo de silicio de grano 800.
- Pulido final con paño y pasta de diamante de 1µm.



**Ataque con reactivo para visualización de precipitados.** El ácido fluorhídrico (HF) es el utilizado para la observación de los precipitados en este tipo de aleaciones. La mezcla preparada es de base acuosa con un contenido de un 0.5% en volumen de HF.

Para la preparación de la probeta a fin de la realización de un examen microscópico se procede como prosigue:

- Ataque con el reactivo indicado durante 10 s.
- Lavado con detergente.
- Rociado de la probeta montada con etanol absoluto.
- Secado de la probeta.

Material utilizado:

- Sierra vertical de cinta sin fin *SAMUR S-1000* para el seccionado previo de las estructuras de aluminio.
- Tronzadora *BUEHLER METASERV Abrasive cutter* para la preparación de muestras.
- Resina fenólica *BUEHLER phenocure (bakelit s)* para la elaboración de probetas.
- Prensa *BUEHLER METASERV Pneumet II* para la polimerización de la resina fenólica y montaje de muestras.
- Pulidora *BUEHLER Grinder-polisher Motopol 8* para la preparación final de probetas metalográficas. Discos de carburo de silicio *BUEHLER MET II* para el pulido de probetas de grosores 180, 320, 600 y 800. Paño para la disolución de pasta de diamante *BUEHLER Microcloth 40-7218*. Pasta de diamante *BUEHLER METADI II 1 micron*. Disolvente para pasta de diamante *WENDT SAMEDI*.
- Etanol absoluto *PANREAC PRS 141086.1214* para la limpieza de la superficie de observación microscópica.
- Reactivo HF 0.5% para la observación microscópica general de aleaciones de aluminio.





## C.2. Historial de elaboración de probetas metalográficas

Probeta	Fecha elaboración	Descripción de lo observado	Zona de extracción	Características	Imágenes capturadas
P01	26/03/2007	Caracterización microestructura de la aleación L-3453 T4.	Perfil lateral.		L-3453 T4(40x).
P02	26/03/2007	Caracterización microestructura de la aleación L-2653 T6.	Laterales de fundición.		L-3453 T6 (40X).
P03	27/03/2007	Caracterización microestructura de la aleación L-3453 T6.	Travesaño de unión de laterales.		L-2653 T6 (40x), L-2653 T6 (8x).
P04	27/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-3453 T4 y L-3453 T4 (1).	Unión soldada travesaño de unión perfiles y central.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P05	27/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-3453 T4 y L-3453 T4 (2).	Unión soldada travesaño de unión perfiles y central.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P06	27/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-3453 T4 y L-3453 T4 (3).	Unión soldada travesaño de unión perfiles y central.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	L-3453 T4-L-3453 T4 (8x) 1, L-3453 T4-L-3453 T4 (40x) 2, AISi5 (8x), AISi5 (40x), grietas, L-3453 T4 (1, 2, 3).
P07	27/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T6. L-2653 (1).	Unión soldada entre laterales y travesaños de unión.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	L-2653 T6-L-3453 T6 (8x) 1, L-2653 T6-L-3453 T6 (40x) 2.
P08	27/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T6. L-2653 (2).	Unión soldada entre laterales y travesaños de unión.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P09	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T6. L-2653 (3).	Unión soldada entre laterales y travesaños de unión.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P10	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T6. L-3453 (1).	Unión soldada entre laterales y travesaños de unión.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	L-2653 T6-L-3453 T6 (8x) 3, L-2653 T6-L-3453 T6 (40x) 4.
P11	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T6. L-3453 (2).	Unión soldada entre laterales y travesaños de unión.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	grietas contracción L-3453 T6 (4, 5).
P12	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T6. L-3453 (3).	Unión soldada entre laterales y travesaños de unión.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	3.
P13	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T4. L-2653 (1).	Unión soldada entre perfil lateral y laterales de fundición.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P14	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T4. L-2653 (2).	Unión soldada entre perfil lateral y laterales de fundición.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P15	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T4. L-2653 (3).	Unión soldada entre perfil lateral y laterales de fundición.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	L-2653 T6-L-3453 T4 (8x) 2, L-2653 T6-L-3453 T4 (40x) 3.



P16	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T4. L-3453 (1).	Unión soldada entre perfil lateral y laterales de fundición.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	L-2653 T6-L-3453 T4 (8x) 4, L-2653 T6-L-3453 T4 (40x) 5.
P17	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T4. L-3453 (2).	Unión soldada entre perfil lateral y laterales de fundición.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P18	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T4. L-3453 (3).	Unión soldada entre perfil lateral y laterales de fundición.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P19	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T4. L-3453 T4 (1).	Unión soldada entre perfiles laterales y tubo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	L-3453 T4-L-3453 T6 (8x) 1, L-3453 T4-L-3453 T6 (40x) 2.
P20	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T4. L-3453 T4 (2).	Unión soldada entre perfiles laterales y tubo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P21	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T4. L-3453 T4 (3).	Unión soldada entre perfiles laterales y tubo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P22	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T4. L-3453 T6 (1).	Unión soldada entre perfiles laterales y tubo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	L-3453 T4-L-3453 T6 (8x) 3, L-3453 T4-L-3453 T6 (40x) 4.
P23	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T4. L-3453 T6 (2).	Unión soldada entre perfiles laterales y tubo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P24	28/03/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T4. L-3453 T6 (3).	Unión soldada entre perfiles laterales y tubo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P25	17/04/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 (1).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P26	18/04/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 (2).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	L-3453 T6-L-3453 T6 (8x) 1, L-3453 T6-L-3453 T6 (40x) 2.
P27	19/04/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 (3).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	Poros soldadura 1.
P28	20/04/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 (1).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P29	21/04/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 (2).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P30	22/04/2007	Evolución pérdida propiedades soldadura entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 (3).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	L-3453 T6-L-3453 T6 (8x) 3, L-3453 T6-L-3453 T6 (40x) 4.



P31	14/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-2653 T6 (1).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	L-2653 T6 reenv 1, L-2653 T6 reenv 2, L-2653 T6 reenv 3, L-2653 T6 reenv 4.
P32	14/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 (1).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P33	14/06/2007	Reenvejecido T=150°C 7 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-2653 T6.	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P34	14/06/2007	Reenvejecido T=150°C 7 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6.	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P35	14/06/2007	Reenvejecido T=150°C 8 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-2653 T6.	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P36	14/06/2007	Reenvejecido T=150°C 8 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6.	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P37	19/06/2007	Reenvejecido T=150°C 3 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-2653 T6.	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P38	19/06/2007	Reenvejecido T=150°C 3 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6.	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P39	19/06/2007	Reenvejecido T=150°C 4 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-2653 T6.	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P40	19/06/2007	Reenvejecido T=150°C 4 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6.	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P41	19/06/2007	Reenvejecido T=150°C 5 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-2653 T6.	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P42	19/06/2007	Reenvejecido T=150°C 5 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6.	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P43	20/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-2653 T6 (2).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P44	20/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 (2).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P45	20/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-2653 T6 (3).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	



P46	20/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 (3).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P47	20/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-2653 T6 (4).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P48	20/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 (4).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P49	20/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-2653 T6 (5).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P50	20/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-2653 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 (5).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P51	25/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-3453 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 Cartela refuerzo (1).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	6082 T6 reenv 1, 6082 T6 reenv 2.
P52	25/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-3453 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 Tubo (1).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P53	25/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-3453 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 Cartela refuerzo (2).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P54	25/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-3453 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 Tubo (2).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P55	25/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-3453 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 Cartela refuerzo (3).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P56	25/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-3453 T6 y L-3453 T6. L-3453 T6 Tubo (3).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P57	28/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-3453 T4 y L-3453 T4 (1).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	T4 sobreenv 1, T4 sobreenv 2.
P58	28/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-3453 T4 y L-3453 T4 (2).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	6082 T4 sobreenv 1, 6082 T4 sobreenv 2.
P59	28/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-3453 T4 y L-3453 T4 (3).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P60	28/06/2007	Reenvejecido T=150°C 1 h en soldadura entre L-3453 T4 y L-3453 T4 (4).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	



P61	28/06/2007	Reenvejecido T=150°C 2 h en soldadura entre L-3453 T4 y L-3453 T4 (5).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P62	28/06/2007	Reenvejecido T=150°C 3 h en soldadura entre L-3453 T4 y L-3453 T4 (6).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P63	28/06/2007	Reenvejecido T=150°C 4 h en soldadura entre L-3453 T4 y L-3453 T4 (7).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P64	28/06/2007	Reenvejecido T=150°C 5 h en soldadura entre L-3453 T4 y L-3453 T4 (8).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P65	28/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-3453 T6 y L-3453 T6 (4).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	
P66	28/06/2007	Reenvejecido T=150°C 6 h en soldadura entre L-3453 T6 y L-3453 T6 (5).	Unión soldada entre cartela de refuerzo y tubo. Cartela refuerzo.	Soldadura a tope MIG. Material de aportación: S-AISI5.	

**Tabla C.1.** Historial de elaboración de probetas metalográficas.





## D. Detalle de los ensayos efectuados

Se detalla a continuación los ensayos efectuados descritos en la memoria del estudio realizado

### D.1. Ensayos de tracción y compresión a carga máxima

Tal y como se ha argumentado en la memoria del proyecto, la realización de este tipo de ensayos es debido a la imposibilidad de la maquinaria de ensayo para realizar una evolución monitorizada del mismo. Por lo tanto, de la metodología descrita en la memoria referente al método de ensayo se anota las deformaciones máxima y permanente para cada carga aplicada.

#### D.1.1. Ensayos de tracción

Las mediciones recogidas durante los ensayos de las cuatro estructuras se observan a continuación (Tablas D.1. y D.2.).

	T1	T2	T3	T4	Estadísticas		
F <sub>x</sub> max	ε máx	ε máx	ε máx	ε máx	ε media	Desv. Est.	Varianza
(kgf)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	1,23	0,98	1,12	0,93	1,07	0,14	0,02
200	2,80	2,50	2,53	2,20	2,51	0,25	0,06
300	4,91	4,35	3,80	3,55	4,15	0,61	0,37
400	6,49	5,70	5,08	4,83	5,53	0,74	0,55
500	7,86	7,08	6,34	6,05	6,83	0,81	0,66
600	9,24	8,39	7,85	7,49	8,24	0,76	0,58
700	10,61	9,72	9,33	8,80	9,62	0,76	0,58
800	11,98	11,08	10,70	10,10	10,97	0,79	0,62
900	13,41	12,49	12,11	11,60	12,40	0,76	0,58
1000	14,78	13,82	13,74	12,98	13,83	0,74	0,54
1100	16,19	15,18	15,17	14,47	15,25	0,71	0,50
1200	17,68	16,63	16,71	16,00	16,76	0,69	0,48
1300	19,29	18,02	18,19	17,41	18,23	0,78	0,61
1400	20,85	19,63	20,10	18,99	19,89	0,78	0,61
1500	23,18	21,24	21,55	20,90	21,72	1,01	1,02
1600	24,38	22,97	23,21	22,48	23,26	0,81	0,65
1700	26,29	24,80	25,05	24,17	25,08	0,89	0,79
1800	28,29	27,07	27,51	26,49	27,34	0,76	0,58
1900	30,58	29,62	29,16	28,73	29,52	0,79	0,63
2000	33,10	31,81	31,56	30,96	31,86	0,90	0,81
2100	36,67	34,94	34,65	33,91	35,04	1,17	1,37
2200	38,64	37,83	37,67	36,81	37,74	0,75	0,56
2300	41,74	-	-	-	-	-	-
2400	46,48	-	-	-	-	-	-
2500	-	-	-	-	-	-	-
2100	-	-	-	-	-	-	-

**Tabla D.1.** Deformación presente en las estructuras por la aplicación de la carga a tracción indicada.



	T1	T2	T3	T4	Estadísticas		
<b>F<sub>x</sub> máx</b>	<b>ε perm</b>	<b>ε perm</b>	<b>ε perm</b>	<b>ε perm</b>	<b>ε media</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
(kgf)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	0,10	0,10	0,17	0,06	0,11	0,05	0,00
200	0,09	0,09	0,24	0,08	0,13	0,08	0,01
300	0,12	0,12	0,29	0,09	0,16	0,09	0,01
400	0,29	0,27	0,30	0,11	0,24	0,09	0,01
500	0,46	0,31	0,44	0,17	0,35	0,13	0,02
600	0,65	0,39	0,70	0,17	0,48	0,25	0,06
700	0,79	0,46	0,81	0,27	0,58	0,26	0,07
800	0,93	0,74	1,06	0,54	0,82	0,23	0,05
900	1,10	0,81	1,27	0,78	0,99	0,24	0,06
1000	1,28	1,06	1,60	1,05	1,25	0,26	0,07
1100	1,50	1,33	1,99	1,25	1,52	0,33	0,11
1200	1,87	1,43	2,16	1,67	1,78	0,31	0,10
1300	2,34	1,91	2,69	1,84	2,20	0,40	0,16
1400	2,76	2,23	3,31	2,28	2,65	0,50	0,25
1500	3,73	2,65	3,69	2,91	3,25	0,55	0,30
1600	3,96	3,29	4,08	3,34	3,67	0,41	0,17
1700	4,80	3,89	4,89	3,94	4,38	0,54	0,29
1800	5,80	5,15	6,05	5,00	5,50	0,50	0,26
1900	6,94	6,24	6,72	6,25	6,54	0,35	0,12
2000	8,19	7,55	8,00	7,24	7,75	0,43	0,19
2100	10,26	9,43	9,73	8,96	9,60	0,54	0,30
2200	11,37	11,22	11,70	11,04	11,33	0,28	0,08
2300	13,37	-	-	-	-	-	-
2400	17,03	-	-	-	-	-	-
2500	-	-	-	-	-	-	-
2100	-	-	-	-	-	-	-

**Tabla D.2.** Deformación permanente medida a los 30 kgf después de la carga máxima a tracción indicada.

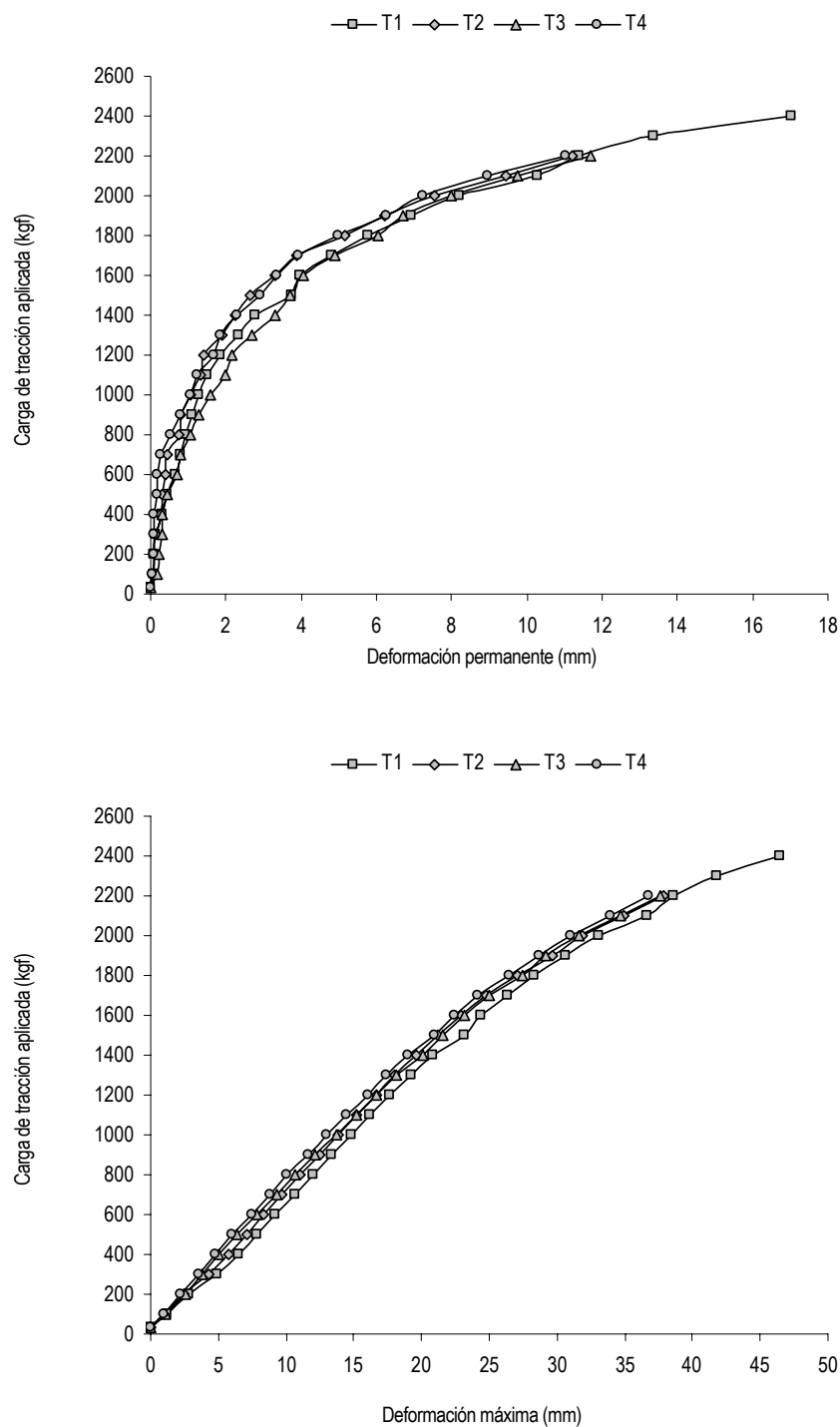
Como comentario a las tablas anteriores se le da más relevancia a las deformaciones permanentes creadas en la estructura medidas a la precarga de ensayo de 30 kgf por tener una influencia más directa sobre la rotura y/o fallo de la estructura observándose para estas unas varianzas y desviaciones estándar aceptables menores a 0,6.

Se acepta, pues, la dispersión de introducida durante el proceso de fabricación y en el procedimiento de soldadura aplicado siendo este un proceso manual aceptándose la introducción de imperfecciones y defectos que el propio proceso conlleva.





Seguidamente se observa la evolución del ensayo a tracción (Fig. D.1.).



**Fig. D.1.** Resultados de los ensayos a tracción. Esfuerzo aplicado en función de la deformación permanente (arriba) y deformación máxima (abajo).



### D.1.2. Ensayos de compresión

Las mediciones recogidas durante los ensayos de las cuatro estructuras se observan a continuación (Tablas D.3. y D.4.).

	C1	C2	C3	C4	Estadísticas		
<b>F<sub>x</sub> máx</b>	<b>ε máx</b>	<b>ε máx</b>	<b>ε máx</b>	<b>ε máx</b>	<b>ε media</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Varianza</b>
(kgf)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	1,09	1,43	0,95	0,89	1,09	0,24	0,06
200	2,62	2,94	2,45	3,02	2,76	0,27	0,07
300	4,03	4,26	3,60	4,31	4,05	0,32	0,10
400	5,38	5,61	4,90	5,06	5,24	0,32	0,10
500	6,86	6,98	6,94	6,64	6,86	0,15	0,02
600	8,31	8,38	8,50	8,52	8,43	0,10	0,01
700	9,83	9,90	9,60	9,02	9,59	0,40	0,16
800	11,83	11,32	11,41	11,38	11,49	0,23	0,05
900	12,83	12,83	13,20	12,82	12,92	0,19	0,03
1000	14,42	14,32	14,26	13,94	14,24	0,21	0,04
1100	16,06	15,85	16,10	15,96	15,99	0,11	0,01
1200	17,50	17,34	17,61	17,21	17,42	0,18	0,03
1300	19,08	19,10	19,20	19,05	19,11	0,06	0,00
1400	20,88	20,74	20,90	19,80	20,58	0,52	0,28
1500	23,17	22,75	22,97	22,32	22,80	0,36	0,13
1600	25,26	25,55	25,60	26,00	25,60	0,30	0,09
1700	28,09	27,56	27,63	27,16	27,61	0,38	0,15
1800	31,10	30,48	29,20	29,10	29,97	0,98	0,96
1900	35,10	34,27	35,20	35,60	35,04	0,56	0,31
2000	42,00	37,92	37,71	37,11	38,69	2,24	5,00
2100	48,48	42,73	-	-	-	-	-
2200	-	-	-	-	-	-	-
2000	-	-	-	-	-	-	-
1800	-	-	-	-	-	-	-

**Tabla D.3.** Deformación presente en las estructuras por la aplicación de la carga a compresión indicada.



	C1	C2	C3	C4	Estadísticas		
F <sub>x</sub> máx	ε perm	ε perm	ε perm	ε perm	ε media	Desv. Est.	Varianza
(kgf)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	0,11	0,04	0,07	0,05	0,07	0,03	0,00
200	0,18	0,19	0,04	0,06	0,12	0,08	0,01
300	0,20	0,23	0,06	0,06	0,14	0,09	0,01
400	0,24	0,30	0,20	0,12	0,22	0,08	0,01
500	0,41	0,42	0,54	0,19	0,39	0,15	0,02
600	0,54	0,46	0,60	0,29	0,47	0,13	0,02
700	0,72	0,67	0,70	0,58	0,67	0,06	0,00
800	0,95	0,84	0,85	0,91	0,89	0,05	0,00
900	1,23	1,06	1,13	0,98	1,10	0,11	0,01
1000	1,42	1,25	1,36	1,14	1,29	0,12	0,02
1100	1,79	1,54	1,52	1,48	1,58	0,14	0,02
1200	2,23	1,66	1,94	1,67	1,88	0,27	0,07
1300	2,57	2,32	2,02	2,03	2,24	0,26	0,07
1400	3,17	2,92	2,78	2,98	2,96	0,16	0,03
1500	4,16	3,75	3,83	3,34	3,77	0,34	0,11
1600	5,03	5,00	4,63	4,23	4,72	0,38	0,14
1700	6,33	6,12	5,73	5,51	5,92	0,37	0,14
1800	7,97	7,79	7,23	6,53	7,38	0,65	0,42
1900	10,54	10,02	9,13	8,56	9,56	0,89	0,79
2000	13,77	12,35	11,50	11,41	12,26	1,09	1,20
2100	16,07	14,86	-	-	-	-	-
2200	-	-	-	-	-	-	-
2000	-	-	-	-	-	-	-
1800	-	-	-	-	-	-	-

**Tabla D.4.** Deformación permanente medida a los 30 kgf después de la carga máxima a compresión indicada.

Como comentario a las tablas anteriores se le da más relevancia a las deformaciones permanentes creadas en la estructura medidas a la precarga de ensayo de 30 kgf por tener una influencia más directa sobre la rotura y/o fallo de la estructura observándose para estas unas varianzas y desviaciones estándar aceptables menores a 0,6, excepto para cargas próximas a la ruptura.

Se acepta, pues, la dispersión de introducida durante el proceso de fabricación y en el procedimiento de soldadura aplicado siendo este un proceso manual aceptándose la introducción de imperfecciones y defectos que el propio proceso conlleva.



Seguidamente se observa la evolución del ensayo a compresión (Fig. D..2.).

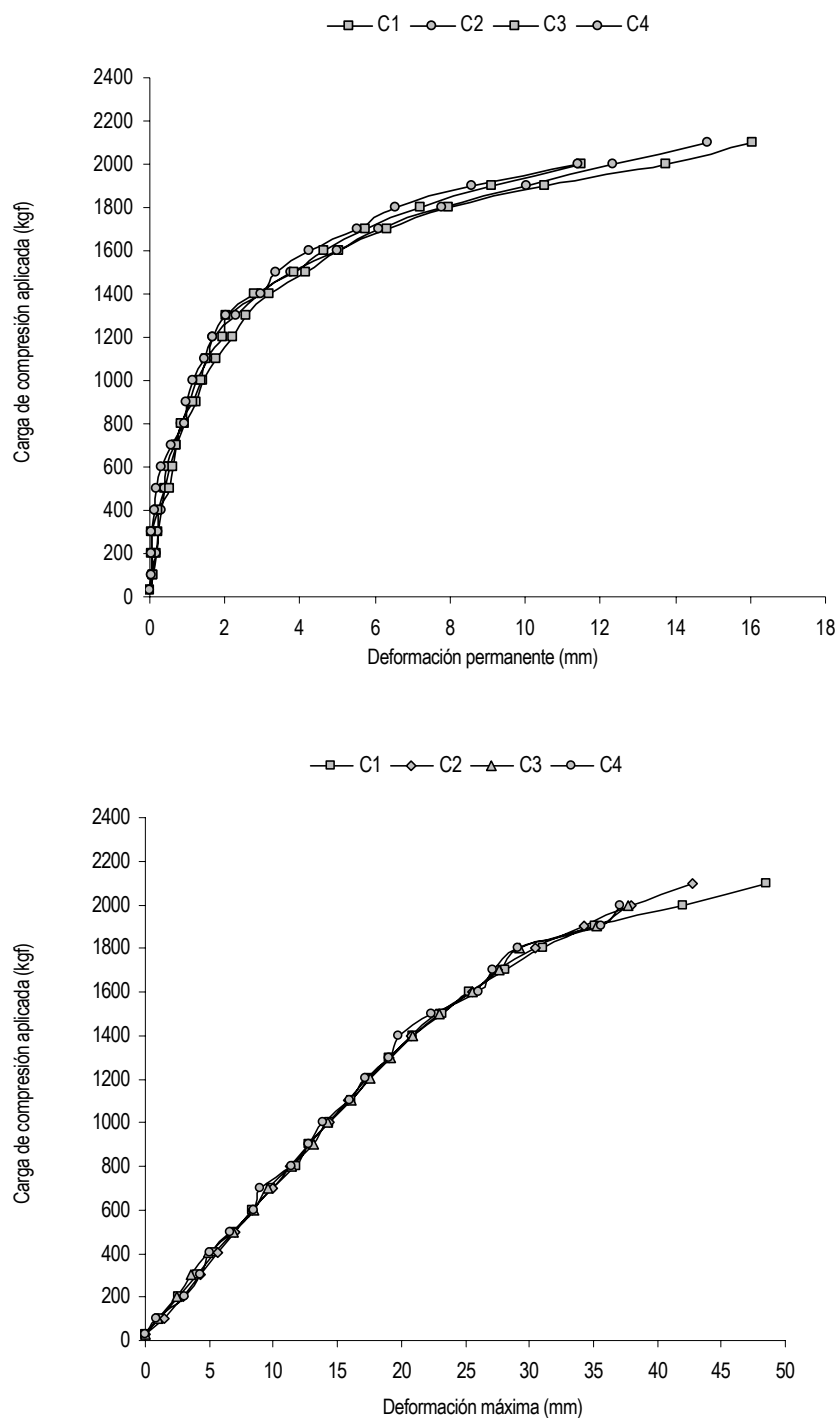


Fig. D.2. Resultados de los ensayos a compresión. Esfuerzo aplicado en función de la deformación permanente (arriba) y deformación máxima (abajo).



## D.2. Análisis de la pérdida de propiedades en ZAT

Seguidamente se detalla el ensayo de dureza Vickers realizado sobre las muestras indicadas. En el estudio posterior de la caída de propiedades se admite, para la determinación de la zona de afectación térmica, un 5% por debajo del valor indicado en la normativa específica para cada aleación.

### D.2.1. Unión entre aleaciones L-3453 T4 y L-3453 T4

	r (mm)	P04	P05	P06	Promedio ensayos	
		HV	HV	HV	HV	HB
L-3453 T4 (flanco izquierdo)	-11,00	74,00	74,30	75,90	74,73	71,00
	-10,75	73,80	74,10	72,80	73,57	69,89
	-10,50	69,30	72,50	72,80	71,53	67,96
	-10,25	70,90	71,70	73,10	71,90	68,31
	-10,00	69,80	70,50	70,20	70,17	66,66
	-9,75	71,30	70,80	70,20	70,77	67,23
	-9,50	70,70	71,00	70,20	70,63	67,10
	-9,25	65,80	70,50	69,80	68,70	65,27
	-9,00	64,80	70,50	70,20	68,50	65,08
	-8,75	62,80	69,10	64,50	65,47	62,19
	-8,50	69,10	69,30	60,90	66,43	63,11
	-8,25	68,80	68,10	57,70	64,87	61,62
	-8,00	69,90	68,10	57,30	65,10	61,85
	-7,75	70,20	68,10	57,30	65,20	61,94
	-7,50	68,30	67,30	59,20	64,93	61,69
	-7,25	71,00	62,80	59,50	64,43	61,21
	-7,00	65,80	66,00	60,20	64,00	60,80
	-6,75	63,60	63,10	63,80	63,50	60,33
	-6,50	63,20	62,20	65,30	63,57	60,39
	-6,25	60,20	59,10	66,00	61,77	58,68
	-6,00	57,90	60,20	70,70	62,93	59,79
	-5,75	59,80	60,20	68,10	62,70	59,57
	-5,50	61,50	60,20	70,70	64,13	60,93
	-5,25	63,60	65,50	70,20	66,43	63,11
	-5,00	66,30	62,80	67,30	65,47	62,19
	-4,75	65,80	71,90	75,70	71,13	67,58
	-4,50	68,30	72,70	73,30	71,43	67,86
	-4,25	71,90	72,70	73,30	72,63	69,00
	-4,00	71,90	76,80	75,20	74,63	70,90
	-3,75	75,10	76,80	75,90	75,93	72,14
	-3,50	75,10	77,20	76,90	76,40	72,58
	-3,25	75,10	75,80	74,90	75,27	71,50
	-3,00	74,20	74,20	71,30	73,23	69,57
	-2,75	73,60	73,30	74,30	73,73	70,05
	-2,50	75,40	73,30	73,90	74,20	70,49
	-2,25	76,60	74,20	72,70	74,50	70,78
	-2,00	77,20	70,20	74,20	73,87	70,17
	-1,75	78,80	70,20	75,10	74,70	70,97
	-1,50	78,80	77,20	75,40	77,13	73,28
	-1,25	75,10	70,20	65,30	70,20	66,69
S-AISI5	-1,00	77,20	60,90	66,50	68,20	64,79
	-0,75	71,90	60,80	60,80	64,50	61,28
	-0,50	71,30	59,80	60,00	63,70	60,52
	-0,25	60,20	56,90	60,20	59,10	56,15
	0,00	73,40	74,30	60,80	69,50	66,03

Tabla D.5. Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T4 y L-3453 T4. Flanco izquierdo.

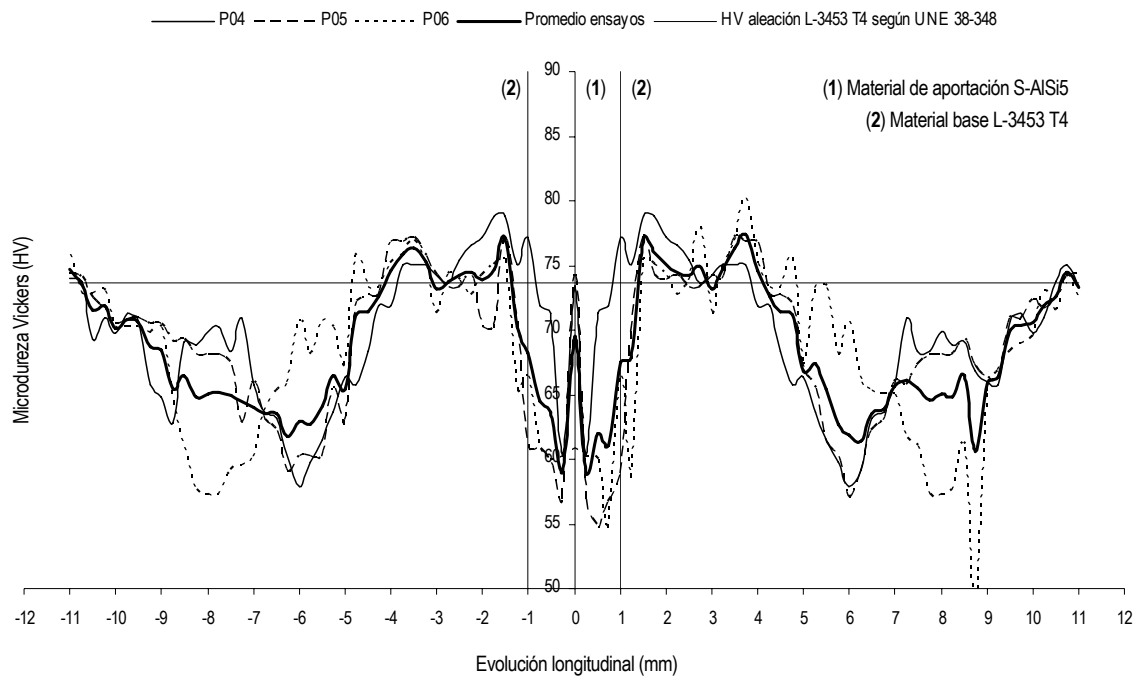


S-AIS5	0,00	73,40	74,30	60,80	69,50	66,03
	0,25	60,20	56,90	60,20	59,10	56,15
	0,50	71,30	54,70	60,00	62,00	58,90
	0,75	71,90	56,70	54,70	61,10	58,05
	1,00	77,20	58,90	66,50	67,53	64,16
L-3453 T4 (flanco derecho)	1,25	75,10	69,90	58,70	67,90	64,51
	1,50	78,80	77,20	75,40	77,13	73,28
	1,75	78,80	74,20	75,10	76,03	72,23
	2,00	77,20	73,90	74,20	75,10	71,35
	2,25	76,60	74,20	72,70	74,50	70,78
	2,50	75,40	73,30	73,90	74,20	70,49
	2,75	73,60	73,30	78,00	74,97	71,22
	3,00	74,20	74,20	71,30	73,23	69,57
	3,25	75,10	74,00	74,90	74,67	70,93
	3,50	75,10	77,20	76,90	76,40	72,58
	3,75	75,10	76,80	80,20	77,37	73,50
	4,00	71,90	76,80	75,20	74,63	70,90
	4,25	71,90	72,70	73,30	72,63	69,00
	4,50	68,30	72,70	73,30	71,43	67,86
	4,75	65,80	71,90	75,70	71,13	67,58
	5,00	66,30	67,00	67,30	66,87	63,52
	5,25	63,60	65,50	73,30	67,47	64,09
	5,50	61,50	61,30	73,30	65,37	62,10
	5,75	59,80	60,20	68,10	62,70	59,57
	6,00	57,90	57,10	70,70	61,90	58,81
	6,25	59,20	59,10	66,00	61,43	58,36
	6,50	63,20	62,20	65,30	63,57	60,39
	6,75	63,60	63,10	65,10	63,93	60,74
	7,00	65,80	66,00	65,10	65,63	62,35
	7,25	71,00	65,80	61,70	66,17	62,86
	7,50	68,30	67,30	61,10	65,57	62,29
	7,75	68,30	68,10	57,30	64,57	61,34
	8,00	69,90	68,10	57,30	65,10	61,85
	8,25	68,80	68,10	57,70	64,87	61,62
	8,50	69,10	69,30	60,90	66,43	63,11
	8,75	66,80	67,20	47,90	60,63	57,60
	9,00	66,00	66,40	65,30	65,90	62,61
	9,25	65,80	66,20	67,00	66,33	63,02
	9,50	70,70	71,00	68,30	70,00	66,50
	9,75	71,30	70,80	68,90	70,33	66,82
	10,00	69,80	72,30	69,50	70,53	67,01
	10,25	70,90	71,70	73,10	71,90	68,31
	10,50	73,80	72,50	71,50	72,60	68,97
	10,75	75,10	74,10	74,20	74,47	70,74
	11,00	73,40	74,30	72,30	73,33	69,67

**Tabla D.6.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T4 y L-3453 T4. Flanco derecho.



Se muestra, a continuación, la curva de dureza promedio obtenida de los ensayos efectuados. La curva promedio se muestra durante todo el estudio y es la que caracteriza las propiedades nominales de la unión entre aleaciones L-3453 T4 para las uniones de la estructura de este tipo en estado bruto de soldadura.



**Fig. D.3.** Evolución longitudinal de la microdureza Vickers para aleaciones L-3453 T4 unidas mediante soldadura con material de aportación S-AISI5. Zona ZAT determinada para ambos flancos; longitud aproximada: 11 mm. HB = 0.95 HV.



## D.2.2. Unión entre aleaciones L-3453 T4 y L-3453 T6

	r (mm)	P19-P22	P20-P23	P21-P24	Promedio ensayos	
		HV	HV	HV	HV	HB
L-3453 T4 (flanco izquierdo)	-19,00	72,20	75,40	75,80	74,47	70,74
	-18,00	72,20	72,20	75,80	73,40	69,73
	-17,00	70,80	75,40	74,50	73,57	69,89
	-16,00	69,80	72,20	72,00	71,33	67,77
	-15,00	62,20	69,80	69,80	67,27	63,90
	-14,00	63,40	65,50	65,70	64,87	61,62
	-13,00	62,20	67,30	62,80	64,10	60,90
	-12,00	59,60	62,40	61,70	61,23	58,17
	-11,75	59,60	60,60	62,40	60,87	57,82
	-11,50	58,50	60,60	57,30	58,80	55,86
	-11,25	58,10	61,30	62,20	60,53	57,51
	-11,00	59,60	60,00	62,70	60,77	57,73
	-10,75	58,30	59,10	61,70	59,70	56,72
	-10,50	57,90	60,00	62,20	60,03	57,03
	-10,25	57,90	60,20	60,20	59,43	56,46
	-10,00	57,10	61,10	61,70	59,97	56,97
	-9,75	55,10	60,90	60,40	58,80	55,86
	-9,50	59,60	61,10	60,80	60,50	57,48
	-9,25	56,10	61,10	61,10	59,43	56,46
	-9,00	58,10	60,20	61,30	59,87	56,87
	-8,75	57,10	59,10	62,30	59,50	56,53
	-8,50	58,90	58,50	61,50	59,63	56,65
	-8,25	59,30	58,90	62,00	60,07	57,06
	-8,00	59,80	59,10	62,90	60,60	57,57
	-7,75	58,90	61,10	63,50	61,17	58,11
	-7,50	60,00	62,00	63,10	61,70	58,62
	-7,25	58,70	62,20	64,20	61,70	58,62
	-7,00	58,70	63,60	64,80	62,37	59,25
	-6,75	62,40	61,30	65,10	62,93	59,79
	-6,50	63,60	62,20	65,30	63,70	60,52
	-6,25	63,60	63,40	66,40	64,47	61,24
	-6,00	61,10	65,30	68,30	64,90	61,66
	-5,75	63,80	68,80	70,10	67,57	64,19
	-5,50	64,30	69,90	71,80	68,67	65,23
	-5,25	65,80	70,20	72,60	69,53	66,06
	-5,00	65,80	69,90	74,20	69,97	66,47
	-4,75	67,00	69,90	73,60	70,17	66,66
	-4,50	67,00	71,30	75,10	71,13	67,58
	-4,25	67,00	67,50	76,80	70,43	66,91
	-4,00	68,10	67,50	77,60	71,07	67,51
	-3,75	68,80	62,40	75,40	68,87	65,42
	-3,50	69,90	68,60	74,30	70,93	67,39
	-3,25	69,40	70,50	75,80	71,90	68,31
	-3,00	70,70	74,50	75,40	73,53	69,86
	-2,75	73,30	73,30	75,40	74,00	70,30
	-2,50	69,60	71,60	72,80	71,33	67,77
	-2,25	71,00	72,70	73,50	72,40	68,78
	-2,00	71,30	75,40	74,80	73,83	70,14
	-1,75	70,20	74,50	68,60	71,10	67,55
	-1,50	72,10	74,80	79,20	75,37	71,60
	-1,25	72,10	74,80	75,70	74,20	70,49
S-AISI5	-1,00	73,60	76,60	80,50	76,90	73,06
	-0,75	75,10	78,80	87,30	80,40	76,38
	-0,50	85,00	62,00	84,00	77,00	73,15
	-0,25	74,20	54,20	67,00	65,13	61,88
	0,00	64,50	64,10	66,00	64,87	61,62

Tabla D.7. Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T4 y L-3453 T6. Flanco izquierdo.



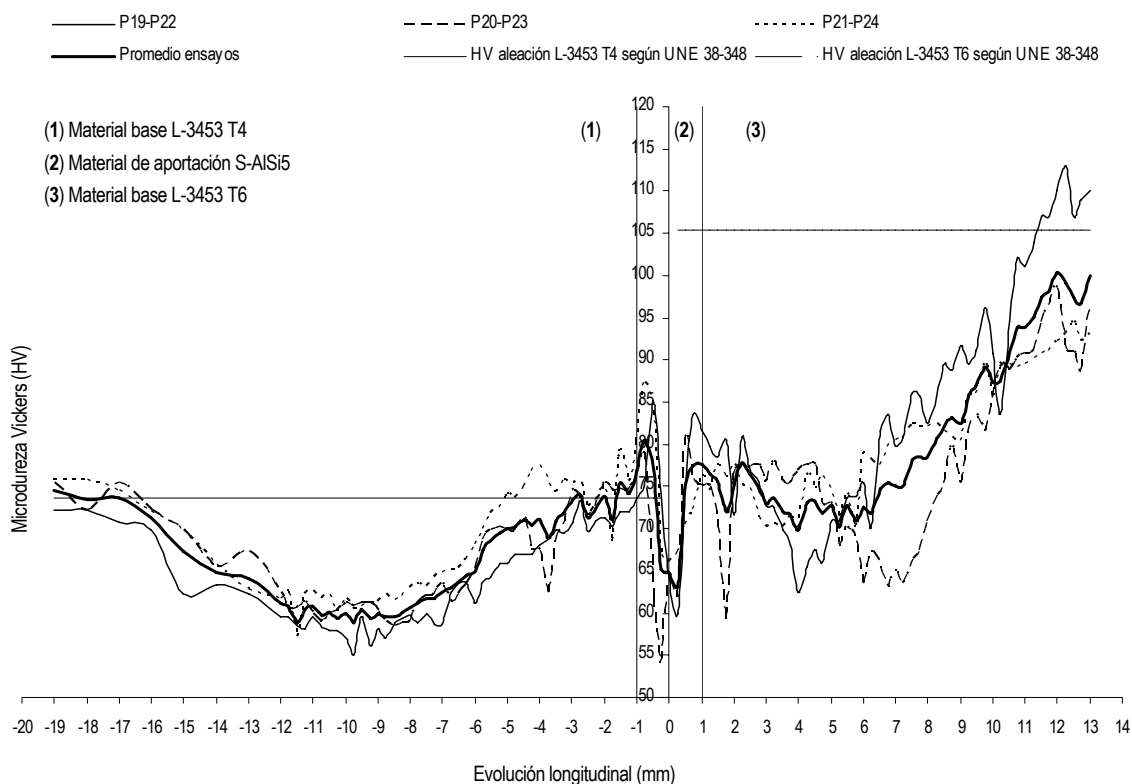


S-AISI5	0,00	64,50	64,10	66,00	64,87	61,62
	0,25	60,00	62,00	67,30	63,10	59,95
	0,50	74,80	80,50	70,50	75,27	71,50
	0,75	83,60	76,00	72,40	77,33	73,47
	1,00	81,50	75,10	76,30	77,63	73,75
L-3453 T6 (flanco derecho)	1,25	79,80	75,10	74,50	76,47	72,64
	1,50	78,50	70,70	77,60	75,60	71,82
	1,75	80,50	59,30	76,20	72,00	68,40
	2,00	71,60	76,60	77,60	75,27	71,50
	2,25	80,80	77,60	75,20	77,87	73,97
	2,50	77,20	77,20	74,90	76,43	72,61
	2,75	75,70	77,60	71,50	74,93	71,19
	3,00	72,70	75,70	70,20	72,87	69,22
	3,25	72,50	77,90	70,60	73,67	69,98
	3,50	69,90	75,70	70,20	71,93	68,34
	3,75	68,10	75,40	71,50	71,67	68,08
	4,00	62,40	76,90	70,20	69,83	66,34
	4,25	65,50	77,60	76,30	73,13	69,48
	4,50	67,50	77,60	74,90	73,33	69,67
	4,75	66,00	73,00	76,30	71,77	68,18
	5,00	71,00	73,00	74,20	72,73	69,10
	5,25	71,00	68,10	71,50	70,20	66,69
	5,50	73,60	70,20	74,20	72,67	69,03
	5,75	73,90	68,60	70,20	70,90	67,36
	6,00	75,40	63,60	78,80	72,60	68,97
	6,25	70,20	67,30	78,20	71,90	68,31
	6,50	81,50	65,30	77,60	74,80	71,06
	6,75	83,60	63,10	79,80	75,50	71,73
	7,00	79,80	65,00	80,50	75,10	71,35
	7,25	80,80	63,60	80,90	75,10	71,35
	7,50	86,10	66,00	82,50	78,20	74,29
	7,75	85,80	67,50	82,20	78,50	74,58
	8,00	82,50	71,00	82,20	78,57	74,64
	8,25	85,80	73,60	82,50	80,63	76,60
	8,50	89,60	75,40	81,50	82,17	78,06
	8,75	88,80	79,80	80,80	83,13	78,98
	9,00	91,60	75,40	80,50	82,50	78,38
	9,25	89,60	81,50	85,80	85,63	81,35
	9,50	91,20	83,60	86,00	86,93	82,59
	9,75	96,20	81,50	89,60	89,10	84,65
	10,00	90,80	85,60	85,80	87,40	83,03
	10,25	83,60	89,60	89,20	87,47	83,09
	10,50	94,50	88,70	89,60	90,93	86,39
	10,75	102,00	90,20	89,20	93,80	89,11
	11,00	101,00	90,80	89,60	93,80	89,11
	11,25	104,00	91,20	90,20	95,13	90,38
	11,50	107,00	94,50	90,80	97,43	92,56
	11,75	107,00	96,50	91,20	98,23	93,32
	12,00	110,00	98,50	92,30	100,27	95,25
	12,25	113,00	91,20	93,20	99,13	94,18
	12,50	107,00	91,00	94,50	97,50	92,63
	12,75	109,00	88,70	92,30	96,67	91,83
	13,00	110,00	96,50	93,20	99,90	94,91

**Tabla D.8.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T4 y L-3453 T6. Flanco derecho.



Se muestra, a continuación, la curva de dureza promedio obtenida de los ensayos efectuados. La curva promedio se muestra durante todo es el estudio y es la que caracteriza las propiedades nominales de la unión entre aleaciones L-3453 T4 y L-3453 T6 para las uniones de la estructura de este tipo en estado bruto de soldadura.



**Fig. D.4.** Evolución longitudinal de la microdureza Vickers para aleaciones L-3453 T4 y L-3453 T6 unidas mediante soldadura con material de aportación S-AISI5. Zona ZAT determinada; longitud aproximada para el flanco izquierdo: 20 mm; longitud aproximada para el flanco derecho: 14 mm. HB = 0.95 HV.



## D.2.3. Unión entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T6

	r (mm)	P25-P28	P26-P29	P27-P30	Promedio ensayos	
		HV	HV	HV	HV	HB
L-3453 T6 (flanco izquierdo)	-19,00	105,00	101,00	108,00	104,67	99,43
	-18,00	101,00	105,00	105,00	103,67	98,48
	-17,00	102,00	101,00	100,00	101,00	95,95
	-16,00	105,00	103,00	98,00	102,00	96,90
	-15,00	101,00	105,00	95,80	100,60	95,57
	-14,00	105,00	101,00	93,60	99,87	94,87
	-13,00	98,80	84,60	91,60	91,67	87,08
	-12,00	94,20	78,80	85,80	86,27	81,95
	-11,75	92,20	72,20	81,20	81,87	77,77
	-11,50	84,00	71,30	86,90	80,73	76,70
	-11,25	88,80	69,10	81,20	79,70	75,72
	-11,00	77,20	65,00	86,50	76,23	72,42
	-10,75	75,40	71,00	84,00	76,80	72,96
	-10,50	65,50	66,00	84,30	71,93	68,34
	-10,25	62,40	68,60	76,30	69,10	65,65
	-10,00	65,80	66,30	83,60	71,90	68,31
	-9,75	68,30	68,30	78,70	71,77	68,18
	-9,50	65,50	63,30	78,50	69,10	65,65
	-9,25	63,80	58,90	73,60	65,43	62,16
	-9,00	66,30	63,40	69,90	66,53	63,21
	-8,75	62,40	66,00	60,20	62,87	59,72
	-8,50	64,30	63,60	69,90	65,93	62,64
	-8,25	64,80	62,40	63,90	63,70	60,52
	-8,00	61,70	66,30	67,80	65,27	62,00
	-7,75	67,00	61,80	66,00	64,93	61,69
	-7,50	60,20	64,10	64,80	63,03	59,88
	-7,25	64,30	59,10	67,50	63,63	60,45
	-7,00	68,60	63,60	63,60	65,27	62,00
	-6,75	66,50	66,00	70,70	67,73	64,35
	-6,50	61,00	63,80	69,90	64,90	61,66
	-6,25	64,80	68,60	70,70	68,03	64,63
	-6,00	67,50	63,60	72,40	67,83	64,44
	-5,75	67,30	68,10	71,80	69,07	65,61
	-5,50	71,30	68,80	71,60	70,57	67,04
	-5,25	73,00	71,00	74,20	72,73	69,10
	-5,00	71,00	71,30	69,60	70,63	67,10
	-4,75	68,30	73,90	71,30	71,17	67,61
	-4,50	69,90	68,80	76,30	71,67	68,08
	-4,25	68,80	69,90	79,50	72,73	69,10
	-4,00	69,60	74,80	77,50	73,97	70,27
	-3,75	69,90	73,30	79,50	74,23	70,52
	-3,50	72,70	71,60	75,10	73,13	69,48
	-3,25	71,00	67,80	76,60	71,80	68,21
	-3,00	73,00	70,50	75,10	72,87	69,22
	-2,75	71,60	71,00	78,50	73,70	70,02
	-2,50	76,90	73,90	71,30	74,03	70,33
	-2,25	68,60	73,30	81,80	74,57	70,84
	-2,00	74,20	74,50	78,80	75,83	72,04
	-1,75	72,70	72,70	78,80	74,73	71,00
	-1,50	77,20	72,70	81,20	77,03	73,18
	-1,25	71,30	77,40	83,60	77,43	73,56
S-AtSi5	-1,00	84,00	72,40	82,70	79,70	75,72
	-0,75	72,70	81,80	82,50	79,00	75,05
	-0,50	68,10	68,80	81,50	72,80	69,16
	-0,25	54,70	59,10	67,50	60,43	57,41
	0,00	54,20	60,40	68,30	60,97	57,92

Tabla D.9. Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T6 y L-3453 T6. Flanco izquierdo.

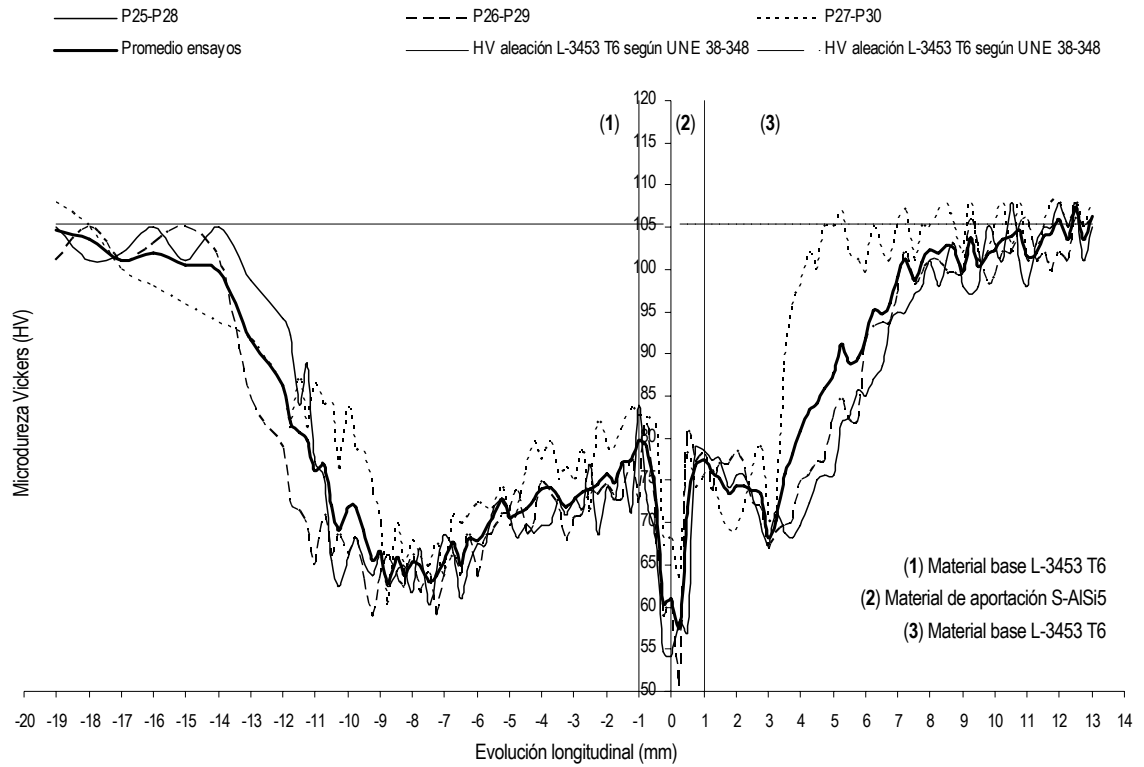


S-AIS5	0,00	54,20	60,40	68,30	60,97	57,92
	0,25	58,50	51,20	63,60	57,77	54,88
	0,50	57,10	80,50	77,90	71,83	68,24
	0,75	78,80	77,20	74,20	76,73	72,90
	1,00	78,50	78,20	75,70	77,47	73,59
L-3453 T6 (flanco derecho)	1,25	77,50	73,90	76,30	75,90	72,11
	1,50	77,60	76,90	71,30	75,27	71,50
	1,75	74,20	76,90	69,10	73,40	69,73
	2,00	75,70	78,50	69,10	74,43	70,71
	2,25	75,70	76,30	71,30	74,43	70,71
	2,50	73,60	72,40	75,70	73,90	70,21
	2,75	69,90	71,60	78,80	73,43	69,76
	3,00	67,30	67,00	70,20	68,17	64,76
	3,25	71,30	68,80	70,60	70,23	66,72
	3,50	68,80	69,60	88,80	75,73	71,95
	3,75	68,30	70,20	95,80	78,10	74,20
	4,00	69,60	74,80	98,00	80,80	76,76
	4,25	72,40	75,70	102,00	83,37	79,20
	4,50	75,10	77,20	100,00	84,10	79,90
	4,75	75,70	77,20	105,00	85,97	81,67
	5,00	75,70	82,50	105,00	87,73	83,35
	5,25	81,80	84,70	107,00	91,17	86,61
	5,50	82,50	82,20	102,00	88,90	84,46
	5,75	85,80	82,00	101,00	89,60	85,12
	6,00	85,00	91,20	99,60	91,93	87,34
	6,25	86,90	93,20	105,00	95,03	90,28
	6,50	88,60	93,60	102,00	94,73	90,00
	6,75	93,60	93,60	101,00	96,07	91,26
	7,00	94,90	97,10	105,00	99,00	94,05
	7,25	94,90	102,00	107,00	101,30	96,24
	7,50	97,10	98,30	101,00	98,80	93,86
	7,75	98,00	99,40	105,00	100,80	95,76
	8,00	101,00	101,00	105,00	102,33	97,22
	8,25	98,00	101,00	107,00	102,00	96,90
	8,50	101,00	99,60	108,00	102,87	97,72
	8,75	103,00	99,60	105,00	102,53	97,41
	9,00	98,00	99,40	102,00	99,80	94,81
	9,25	97,10	106,00	108,00	103,70	98,52
	9,50	98,00	102,00	101,00	100,33	95,32
	9,75	105,00	98,30	102,00	101,77	96,68
	10,00	103,00	99,20	105,00	102,40	97,28
	10,25	101,00	102,00	108,00	103,67	98,48
	10,50	108,00	102,00	102,00	104,00	98,80
	10,75	101,00	105,00	108,00	104,67	99,43
	11,00	98,00	106,00	101,00	101,67	96,58
	11,25	103,00	101,00	102,00	102,00	96,90
	11,50	105,00	102,00	105,00	104,00	98,80
	11,75	105,00	99,80	108,00	104,27	99,05
	12,00	108,00	102,00	108,00	106,00	100,70
	12,25	105,00	101,00	105,00	103,67	98,48
	12,50	108,00	106,00	108,00	107,33	101,97
	12,75	101,00	105,00	105,00	103,67	98,48
	13,00	105,00	106,00	108,00	106,33	101,02

Tabla D.10. Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T6 y L-3453 T6. Flanco derecho.



Se muestra, a continuación, la curva de dureza promedio obtenida de los ensayos efectuados. La curva promedio se muestra durante todo el estudio y es la que caracteriza las propiedades nominales de la unión entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T6 para las uniones de la estructura de este tipo en estado bruto de soldadura.



**Fig. D.5.** Evolución longitudinal de la microdureza Vickers para aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T6 unidas mediante soldadura con material de aportación S-AlSi5. Zona ZAT determinada; longitud aproximada para el flanco izquierdo: 20 mm. Zona ZAT determinada para el flanco derecho; longitud: 10 mm. HB = 0.95 HV.



## D.2.4. Unión entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T4

	r (mm)	P13-P16	P14-P17	P15-P18	Promedio ensayos	
		HV	HV	HV	HV	HB
L-2653 T6 (flanco izquierdo)	-13,00	108,00	107,00	116,00	110,33	104,82
	-12,75	108,00	116,00	105,00	109,67	104,18
	-12,50	102,00	113,00	116,00	110,33	104,82
	-12,25	108,00	106,00	106,00	106,67	101,33
	-12,00	99,80	95,80	107,00	100,87	95,82
	-11,75	107,00	100,00	116,00	107,67	102,28
	-11,50	102,00	112,00	113,00	109,00	103,55
	-11,25	94,10	100,00	106,00	100,03	95,03
	-11,00	101,00	113,00	112,00	108,67	103,23
	-10,75	110,00	107,00	100,00	105,67	100,38
	-10,50	113,00	107,00	113,00	111,00	105,45
	-10,25	108,00	95,80	107,00	103,60	98,42
	-10,00	108,00	113,00	107,00	109,33	103,87
	-9,75	125,00	102,00	113,00	113,33	107,67
	-9,50	128,00	112,00	106,00	115,33	109,57
	-9,25	101,00	106,00	95,80	100,93	95,89
	-9,00	103,00	106,00	100,00	103,00	97,85
	-8,75	94,50	100,00	102,00	98,83	93,89
	-8,50	71,30	112,00	106,00	96,43	91,61
	-8,25	91,60	113,00	113,00	105,87	100,57
	-8,00	81,20	112,00	105,00	99,40	94,43
	-7,75	75,40	100,00	116,00	97,13	92,28
	-7,50	87,30	95,80	107,00	96,70	91,87
	-7,25	80,20	106,00	95,80	94,00	89,30
	-7,00	75,10	113,00	81,20	89,77	85,28
	-6,75	68,60	116,00	70,50	85,03	80,78
	-6,50	76,30	107,00	69,90	84,40	80,18
	-6,25	68,30	87,30	74,20	76,60	72,77
	-6,00	77,20	61,30	84,30	74,27	70,55
	-5,75	82,20	71,60	79,20	77,67	73,78
	-5,50	76,00	72,70	75,70	74,80	71,06
	-5,25	71,30	70,70	78,50	73,50	69,83
	-5,00	69,90	72,70	79,80	74,13	70,43
	-4,75	76,30	74,50	82,20	77,67	73,78
	-4,50	81,80	85,40	78,80	82,00	77,90
	-4,25	63,40	87,60	82,20	77,73	73,85
	-4,00	66,00	68,30	76,30	70,20	66,69
	-3,75	70,50	68,30	77,20	72,00	68,40
	-3,50	83,60	77,60	64,80	75,33	71,57
	-3,25	83,20	71,00	69,10	74,43	70,71
	-3,00	75,70	75,40	77,20	76,10	72,30
	-2,75	71,30	80,20	75,80	75,77	71,98
	-2,50	76,60	71,60	96,70	81,63	77,55
	-2,25	79,80	80,50	75,10	78,47	74,54
	-2,00	82,50	76,00	74,50	77,67	73,78
	-1,75	74,20	82,50	78,50	78,40	74,48
	-1,50	69,60	79,50	81,80	76,97	73,12
	-1,25	65,00	84,30	78,80	76,03	72,23
SAIS5	-1,00	61,70	84,70	71,60	72,67	69,03
	-0,75	67,00	82,50	78,20	75,90	72,11
	-0,50	64,50	94,10	84,00	80,87	76,82
	-0,25	65,50	86,50	66,50	72,83	69,19
	0,00	61,70	64,80	62,20	62,90	59,76

Tabla D.11. Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T4. Flanco izquierdo.

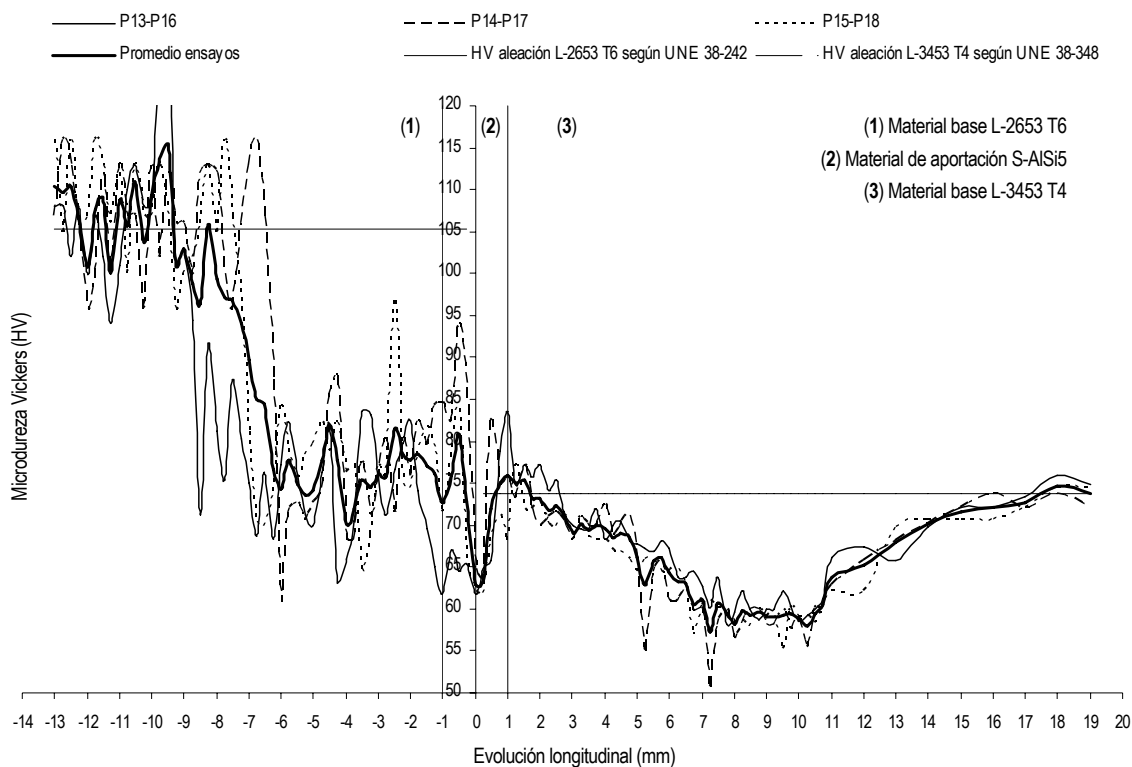


S-AISI5	0,00	61,70	64,80	62,20	62,90	59,76
	0,25	64,80	63,40	62,00	63,40	60,23
	0,50	65,80	82,20	68,10	72,03	68,43
	0,75	78,80	75,10	71,30	75,07	71,31
	1,00	83,60	75,70	68,30	75,87	72,07
L-3453 T4 (flanco derecho)	1,25	74,80	73,30	77,20	75,10	71,35
	1,50	77,20	77,20	71,90	75,43	71,66
	1,75	75,70	71,90	71,90	73,17	69,51
	2,00	77,20	69,90	72,70	73,27	69,60
	2,25	74,20	71,00	70,20	71,80	68,21
	2,50	75,40	71,60	69,90	72,30	68,69
	2,75	71,60	70,50	71,30	71,13	67,58
	3,00	69,90	68,30	68,80	69,00	65,55
	3,25	69,60	71,00	69,90	70,17	66,66
	3,50	69,60	69,90	68,60	69,37	65,90
	3,75	71,90	69,90	68,30	70,03	66,53
	4,00	68,30	72,40	68,30	69,67	66,18
	4,25	69,90	68,80	67,00	68,57	65,14
	4,50	70,50	69,90	66,80	69,07	65,61
	4,75	68,10	71,30	66,00	68,47	65,04
	5,00	67,80	66,00	64,50	66,10	62,80
	5,25	67,30	55,10	66,00	62,80	59,66
	5,50	66,80	64,50	66,00	65,77	62,48
	5,75	68,10	66,00	64,50	66,20	62,89
	6,00	67,30	61,10	64,50	64,30	61,09
	6,25	63,80	61,10	64,80	63,23	60,07
	6,50	63,80	62,70	62,40	62,97	59,82
	6,75	64,50	59,80	57,10	60,47	57,44
	7,00	62,70	60,00	60,60	61,10	58,05
	7,25	60,20	50,70	61,10	57,33	54,47
	7,50	63,80	58,10	60,20	60,70	57,67
	7,75	58,10	60,00	60,00	59,37	56,40
	8,00	59,60	56,50	58,50	58,20	55,29
	8,25	62,20	58,30	58,70	59,73	56,75
	8,50	60,00	60,00	57,90	59,30	56,34
	8,75	58,70	60,00	60,00	59,57	56,59
	9,00	60,00	58,10	59,30	59,13	56,18
	9,25	60,00	58,10	59,30	59,13	56,18
	9,50	62,20	60,00	55,30	59,17	56,21
	9,75	60,40	57,70	60,20	59,43	56,46
	10,00	58,50	59,10	59,10	58,90	55,96
	10,25	59,30	55,40	59,30	58,00	55,10
	10,50	60,00	60,20	58,30	59,50	56,53
	10,75	61,30	60,20	60,20	60,57	57,54
	11,00	66,20	62,80	62,20	63,73	60,55
	12,00	67,50	65,80	62,20	65,17	61,91
	13,00	65,80	68,10	69,80	67,90	64,51
	14,00	69,80	70,20	70,60	70,20	66,69
	15,00	72,20	72,20	70,60	71,67	68,08
	16,00	72,20	73,80	70,60	72,20	68,59
	17,00	73,40	72,20	72,20	72,60	68,97
	18,00	75,90	73,80	74,50	74,73	71,00
	19,00	74,80	72,20	74,50	73,83	70,14

Tabla D.12. Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T4. Flanco derecho.



Se muestra, a continuación, la curva de dureza promedio obtenida de los ensayos efectuados. La curva promedio se muestra durante todo el estudio y es la que caracteriza las propiedades nominales de la unión entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T4 para las uniones de la estructura de este tipo en estado bruto de soldadura.



**Fig. D.6.** Evolución longitudinal de la microdureza Vickers para aleaciones de L-2653 T6 y L-3453 T4 unidas mediante soldadura con material de aportación S-AISI5. Zona ZAT determinada para el flanco izquierdo; longitud: 10 mm. Zona ZAT determinada para el flanco derecho; longitud: 20 mm. HB = 0.95 HV.





## D.2.5. Unión entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T6

	r (mm)	P07-P10	P08-P11	P09-P12	Promedio ensayos	
		HV	HV	HV	HV	HB
L-2653 T6 (flanco izquierdo)	-13,00	96,70	103,40	104,20	101,43	96,36
	-12,75	104,00	104,20	103,50	103,90	98,71
	-12,50	103,00	105,60	105,30	104,63	99,40
	-12,25	95,30	102,80	102,00	100,03	95,03
	-12,00	90,40	103,40	100,20	98,00	93,10
	-11,75	81,80	97,90	98,80	92,83	88,19
	-11,50	80,50	95,80	100,10	92,13	87,53
	-11,25	78,50	98,90	99,20	92,20	87,59
	-11,00	76,30	94,50	105,30	92,03	87,43
	-10,75	69,90	79,30	102,30	83,83	79,64
	-10,50	84,00	78,40	100,80	87,73	83,35
	-10,25	87,20	78,20	104,30	89,90	85,41
	-10,00	75,70	76,30	100,50	84,17	79,96
	-9,75	66,30	71,00	102,00	79,77	75,78
	-9,50	77,20	72,70	111,00	86,97	82,62
	-9,25	80,20	74,80	102,00	85,67	81,38
	-9,00	75,10	73,60	108,00	85,57	81,29
	-8,75	71,00	76,00	94,10	80,37	76,35
	-8,50	62,20	73,90	90,40	75,50	71,73
	-8,25	68,10	73,60	87,30	76,33	72,52
	-8,00	68,10	75,40	92,40	78,63	74,70
	-7,75	66,30	70,10	80,20	72,20	68,59
	-7,50	67,30	70,50	78,50	72,10	68,50
	-7,25	62,90	71,00	76,30	70,07	66,56
	-7,00	69,90	77,20	73,60	73,57	69,89
	-6,75	68,60	72,70	82,30	74,53	70,81
	-6,50	64,80	69,60	89,20	74,53	70,81
	-6,25	66,80	67,50	85,40	73,23	69,57
	-6,00	69,10	69,10	69,10	69,10	65,65
	-5,75	65,50	75,10	72,70	71,10	67,55
	-5,50	60,60	69,10	74,80	68,17	64,76
	-5,25	71,90	62,20	68,60	67,57	64,19
	-5,00	67,30	64,50	75,10	68,97	65,52
	-4,75	72,70	69,60	72,10	71,47	67,89
	-4,50	75,10	69,40	65,00	69,83	66,34
	-4,25	71,00	70,50	62,90	68,13	64,73
	-4,00	71,00	80,50	73,60	75,03	71,28
	-3,75	71,30	59,80	68,80	66,63	63,30
	-3,50	76,00	61,50	63,90	67,13	63,78
	-3,25	63,60	69,90	64,10	65,87	62,57
	-3,00	68,80	66,00	66,00	66,93	63,59
	-2,75	65,00	68,10	67,00	66,70	63,37
	-2,50	65,80	72,70	68,30	68,93	65,49
	-2,25	65,50	61,30	69,60	65,47	62,19
	-2,00	67,30	67,50	71,00	68,60	65,17
	-1,75	63,10	78,80	69,90	70,60	67,07
	-1,50	62,00	78,20	66,50	68,90	65,46
	-1,25	65,30	73,20	68,80	69,10	65,65
S-AISI6	-1,00	62,30	73,10	74,80	70,07	66,56
	-0,75	61,80	70,50	72,40	68,23	64,82
	-0,50	62,40	82,20	71,30	71,97	68,37
	-0,25	58,60	69,90	61,30	63,27	60,10
	0,00	66,00	61,30	61,10	62,80	59,66

Tabla D.13. Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T6. Flanco izquierdo.

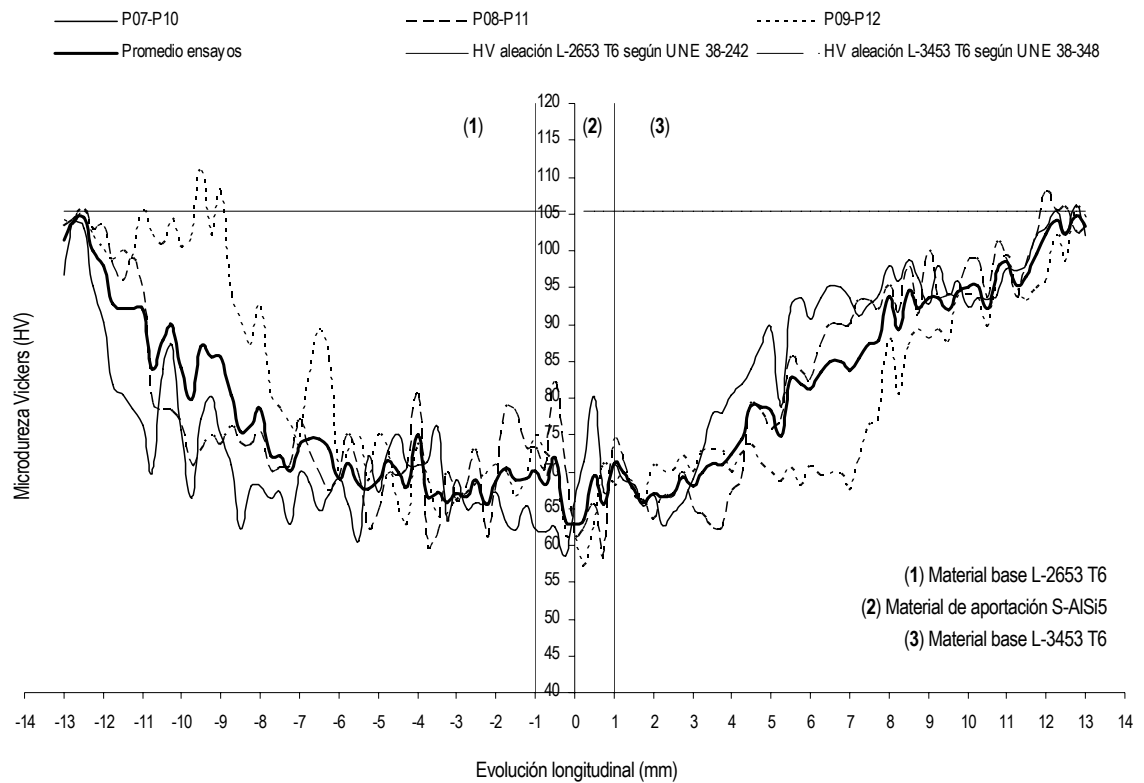


S-AIS5	0,00	66,00	61,30	61,10	62,80	59,66
	0,25	71,30	62,20	57,10	63,53	60,36
L-3453 T6 (flanco derecho)	0,50	80,20	65,50	62,90	69,53	66,06
	0,75	67,20	58,30	71,00	65,50	62,23
	1,00	71,00	74,20	68,10	71,10	67,55
	1,25	68,80	71,30	69,90	70,00	66,50
	1,50	68,30	66,50	68,30	67,70	64,32
	1,75	65,30	66,00	65,80	65,70	62,42
	2,00	66,80	63,60	70,70	67,03	63,68
	2,25	62,70	66,60	70,20	66,50	63,18
	2,50	64,50	66,60	70,20	67,10	63,75
	2,75	65,80	69,90	72,10	69,27	65,80
	3,00	69,10	65,00	69,90	68,00	64,60
	3,25	72,70	64,10	72,70	69,83	66,34
	3,50	77,90	62,20	73,00	71,03	67,48
	3,75	77,90	62,20	72,70	70,93	67,39
	4,00	80,50	67,00	69,90	72,47	68,84
	4,25	81,80	69,10	72,40	74,43	70,71
	4,50	84,00	79,20	73,60	78,93	74,99
	4,75	87,30	77,90	71,00	78,73	74,80
	5,00	89,60	75,70	69,90	78,40	74,48
	5,25	78,80	77,20	68,60	74,87	71,12
	5,50	92,40	85,40	70,50	82,77	78,63
	5,75	93,60	83,60	68,10	81,77	77,68
	6,00	90,80	82,50	70,70	81,33	77,27
	6,25	93,60	87,30	69,40	83,43	79,26
	6,50	95,30	90,00	69,60	84,97	80,72
	6,75	95,10	90,00	69,60	84,90	80,66
	7,00	93,60	90,00	67,50	83,70	79,52
	7,25	91,20	93,20	71,60	85,33	81,07
	7,50	92,80	93,20	76,30	87,43	83,06
	7,75	94,10	92,00	77,20	87,77	83,38
	8,00	98,00	95,30	88,00	93,77	89,08
	8,25	95,80	91,60	80,50	89,30	84,84
	8,50	98,70	98,00	87,30	94,67	89,93
	8,75	96,30	91,20	89,20	92,23	87,62
	9,00	92,80	100,00	88,00	93,60	88,92
	9,25	98,00	93,60	89,20	93,60	88,92
	9,50	94,10	94,10	87,60	91,93	87,34
	9,75	95,80	94,10	93,60	94,50	89,78
	10,00	92,40	98,50	94,10	95,00	90,25
	10,25	93,60	98,70	93,60	95,30	90,54
	10,50	93,30	93,70	89,60	92,20	87,59
	10,75	94,10	101,00	96,70	97,27	92,40
	11,00	97,50	98,70	99,40	98,53	93,61
	11,25	97,30	93,70	94,90	95,30	90,54
	11,50	98,10	98,00	93,20	96,43	91,61
	11,75	102,10	102,00	94,90	99,67	94,68
	12,00	103,10	108,00	95,80	102,30	97,19
	12,25	105,30	105,30	102,00	104,20	98,99
	12,50	102,50	105,80	98,50	102,27	97,15
	12,75	106,10	102,40	105,80	104,77	99,53
	13,00	102,10	103,10	104,60	103,27	98,10

Tabla D.14. Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T6. Flanco derecho.



Se muestra, a continuación, la curva de dureza promedio obtenida de los ensayos efectuados. La curva promedio se muestra durante todo el estudio y es la que caracteriza las propiedades nominales de la unión entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T6 para las uniones de la estructura de este tipo en estado bruto de soldadura.



**Fig. D.7.** Evolución longitudinal de la microdureza Vickers para aleaciones de L-2653 T6 y L-3453 T6 unidas mediante soldadura con material de aportación S-AlSi5. Zona ZAT determinada; longitud aproximada para el flanco izquierdo: 13 mm; longitud aproximada para el flanco derecho: 13 mm. HB = 0.95 HV.





## E. Detalle de los ensayos de optimización. Reenvejecido ZAT

### E.1. Unión entre aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T6

	r (mm)	P37 - P38				P39 - P40			
		150°C 3h				150°C 4h			
		HV1	HV2	HV3	Media	HV1	HV2	HV3	Media
L-2653 T6 (flanco izquierdo)	-13,00	108,00	109,80	106,20	108,00	107,00	107,90	106,10	107,00
	-12,75	105,00	106,80	103,20	105,00	103,00	103,90	102,10	103,00
	-12,50	102,00	103,80	100,20	102,00	105,00	105,90	104,10	105,00
	-12,25	108,00	109,80	106,20	108,00	101,00	101,90	100,10	101,00
	-12,00	113,00	114,80	111,20	113,00	98,50	99,40	97,60	98,50
	-11,75	116,00	117,80	114,20	116,00	97,50	98,40	96,60	97,50
	-11,50	110,00	111,80	108,20	110,00	95,80	96,70	94,90	95,80
	-11,25	102,00	103,80	100,20	102,00	90,40	91,30	89,50	90,40
	-11,00	94,50	96,30	92,70	94,50	88,80	89,70	87,90	88,80
	-10,75	99,80	101,60	98,00	99,80	86,50	87,40	85,60	86,50
	-10,50	94,50	96,30	92,70	94,50	85,80	86,70	84,90	85,80
	-10,25	90,40	92,20	88,60	90,40	77,60	78,50	76,70	77,60
	-10,00	93,60	95,40	91,80	93,60	72,70	73,60	71,80	72,70
	-9,75	90,40	92,20	88,60	90,40	75,60	76,50	74,70	75,60
	-9,50	86,70	88,50	84,90	86,70	77,20	78,10	76,30	77,20
	-9,25	87,10	88,90	85,30	87,10	79,10	80,00	78,20	79,10
	-9,00	80,20	82,00	78,40	80,20	80,50	81,40	79,60	80,50
	-8,75	84,00	85,80	82,20	84,00	76,40	77,30	75,50	76,40
	-8,50	82,80	84,60	81,00	82,80	72,70	73,60	71,80	72,70
	-8,25	83,60	85,40	81,80	83,60	69,10	70,00	68,20	69,10
	-8,00	84,00	85,80	82,20	84,00	68,60	69,50	67,70	68,60
	-7,75	80,40	82,20	78,60	80,40	70,60	71,50	69,70	70,60
	-7,50	82,30	84,10	80,50	82,30	74,20	75,10	73,30	74,20
	-7,25	79,10	80,90	77,30	79,10	68,60	69,50	67,70	68,60
	-7,00	72,70	74,50	70,90	72,70	62,40	63,30	61,50	62,40
	-6,75	76,50	78,30	74,70	76,50	62,90	63,80	62,00	62,90
	-6,50	77,10	78,90	75,30	77,10	62,40	63,30	61,50	62,40
	-6,25	73,60	75,40	71,80	73,60	68,60	69,50	67,70	68,60
	-6,00	71,30	73,10	69,50	71,30	71,30	72,20	70,40	71,30
	-5,75	69,50	71,30	67,70	69,50	71,60	72,50	70,70	71,60
	-5,50	65,90	67,70	64,10	65,90	72,70	73,60	71,80	72,70
	-5,25	64,80	66,60	63,00	64,80	68,60	69,50	67,70	68,60
	-5,00	64,80	66,60	63,00	64,80	64,80	65,70	63,90	64,80
	-4,75	65,90	67,70	64,10	65,90	66,20	67,10	65,30	66,20
	-4,50	70,30	72,10	68,50	70,30	68,80	69,70	67,90	68,80
	-4,25	65,40	67,20	63,60	65,40	64,80	65,70	63,90	64,80
	-4,00	63,60	65,40	61,80	63,60	62,40	63,30	61,50	62,40
	-3,75	65,40	67,20	63,60	65,40	64,80	65,70	63,90	64,80
	-3,50	63,60	65,40	61,80	63,60	67,30	68,20	66,40	67,30
	-3,25	65,90	67,70	64,10	65,90	67,30	68,20	66,40	67,30
	-3,00	63,60	65,40	61,80	63,60	67,30	68,20	66,40	67,30
	-2,75	70,30	72,10	68,50	70,30	70,10	71,00	69,20	70,10
	-2,50	76,80	78,60	75,00	76,80	74,50	75,40	73,60	74,50
	-2,25	82,60	84,40	80,80	82,60	70,10	71,00	69,20	70,10
	-2,00	89,60	91,40	87,80	89,60	69,10	70,00	68,20	69,10
	-1,75	82,60	84,40	80,80	82,60	70,10	71,00	69,20	70,10
	-1,50	79,70	81,50	77,90	79,70	71,90	72,80	71,00	71,90
	-1,25	78,80	80,60	77,00	78,80	70,10	71,00	69,20	70,10
S-AISI5	-1,00	78,80	80,60	77,00	78,80	68,60	69,50	67,70	68,60
	-0,75	78,60	80,40	76,80	78,60	73,90	74,80	73,00	73,90
	-0,50	72,90	74,70	71,10	72,90	78,80	79,70	77,90	78,80
	-0,25	78,80	80,60	77,00	78,80	70,90	71,80	70,00	70,90
	0,00	70,30	72,10	68,50	70,30	62,40	63,30	61,50	62,40

**Tabla E.1.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 3 y 4 h. Flanco izquierdo.



S-AIS5	0,00	70,30	72,10	68,50	70,30	62,40	63,30	61,50	62,40
	0,25	65,00	66,80	63,20	65,00	64,00	64,90	63,10	64,00
	0,50	67,00	68,80	65,20	67,00	70,20	71,10	69,30	70,20
	0,75	67,00	68,80	65,20	67,00	64,30	65,20	63,40	64,30
	1,00	67,00	68,80	65,20	67,00	69,10	70,00	68,20	69,10
L-3453 T6 (flanco derecho)	1,25	72,20	74,00	70,40	72,20	69,10	70,00	68,20	69,10
	1,50	72,20	74,00	70,40	72,20	69,10	70,00	68,20	69,10
	1,75	67,90	69,70	66,10	67,90	62,20	63,10	61,30	62,20
	2,00	70,50	72,30	68,70	70,50	64,80	65,70	63,90	64,80
	2,25	67,50	69,30	65,70	67,50	64,20	65,10	63,30	64,20
	2,50	70,20	72,00	68,40	70,20	62,20	63,10	61,30	62,20
	2,75	72,20	74,00	70,40	72,20	62,90	63,80	62,00	62,90
	3,00	75,90	77,70	74,10	75,90	65,80	66,70	64,90	65,80
	3,25	72,20	74,00	70,40	72,20	62,20	63,10	61,30	62,20
	3,50	72,20	74,00	70,40	72,20	69,20	70,10	68,30	69,20
	3,75	71,30	73,10	69,50	71,30	69,20	70,10	68,30	69,20
	4,00	69,80	71,60	68,00	69,80	70,50	71,40	69,60	70,50
	4,25	64,90	66,70	63,10	64,90	74,43	75,33	73,53	74,43
	4,50	72,20	74,00	70,40	72,20	76,20	77,10	75,30	76,20
	4,75	76,80	78,60	75,00	76,80	76,80	77,70	75,90	76,80
	5,00	74,90	76,70	73,10	74,90	76,20	77,10	75,30	76,20
	5,25	75,90	77,70	74,10	75,90	72,20	73,10	71,30	72,20
	5,50	80,50	82,30	78,70	80,50	79,30	80,20	78,40	79,30
	5,75	80,60	82,40	78,80	80,60	78,10	79,00	77,20	78,10
	6,00	78,20	80,00	76,40	78,20	72,80	73,70	71,90	72,80
	6,25	78,20	80,00	76,40	78,20	79,60	80,50	78,70	79,60
	6,50	86,40	88,20	84,60	86,40	82,70	83,60	81,80	82,70
	6,75	84,20	86,00	82,40	84,20	82,70	83,60	81,80	82,70
	7,00	82,00	83,80	80,20	82,00	80,60	81,50	79,70	80,60
	7,25	82,00	83,80	80,20	82,00	82,20	83,10	81,30	82,20
	7,50	85,60	87,40	83,80	85,60	80,60	81,50	79,70	80,60
	7,75	89,50	91,30	87,70	89,50	82,90	83,80	82,00	82,90
	8,00	94,20	96,00	92,40	94,20	85,40	86,30	84,50	85,40
	8,25	97,50	99,30	95,70	97,50	85,40	86,30	84,50	85,40
	8,50	95,80	97,60	94,00	95,80	89,60	90,50	88,70	89,60
	8,75	96,20	98,00	94,40	96,20	89,90	90,80	89,00	89,90
	9,00	96,30	98,10	94,50	96,30	90,20	91,10	89,30	90,20
	9,25	93,60	95,40	91,80	93,60	89,60	90,50	88,70	89,60
	9,50	96,20	98,00	94,40	96,20	92,20	93,10	91,30	92,20
	9,75	96,20	98,00	94,40	96,20	89,60	90,50	88,70	89,60
	10,00	91,20	93,00	89,40	91,20	91,20	92,10	90,30	91,20
	10,25	98,30	100,10	96,50	98,30	94,20	95,10	93,30	94,20
	10,50	96,20	98,00	94,40	96,20	96,30	97,20	95,40	96,30
	10,75	98,20	100,00	96,40	98,20	98,20	99,10	97,30	98,20
	11,00	92,80	94,60	91,00	92,80	96,30	97,20	95,40	96,30
	11,25	101,00	102,80	99,20	101,00	96,30	97,20	95,40	96,30
	11,50	102,00	103,80	100,20	102,00	96,30	97,20	95,40	96,30
	11,75	105,00	106,80	103,20	105,00	98,80	99,70	97,90	98,80
	12,00	103,00	104,80	101,20	103,00	101,00	101,90	100,10	101,00
	12,25	101,00	102,80	99,20	101,00	101,00	101,90	100,10	101,00
	12,50	105,00	106,80	103,20	105,00	101,00	101,90	100,10	101,00
	12,75	101,00	102,80	99,20	101,00	100,00	100,90	99,10	100,00
	13,00	103,00	104,80	101,20	103,00	105,00	105,90	104,10	105,00

**Tabla E.2.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 3 y 4 h. Flanco derecho.



	r (mm)	P41 - P42				P31 - P32			
		150°C 5h				150°C 6h			
		HV1	HV2	HV3	Media	HV1	HV2	HV3	Media
L-2653 T6 (flanco izquierdo)	-13,00	108,00	110,00	106,00	108,00	116,00	118,00	118,00	117,33
	-12,75	103,00	105,00	101,00	103,00	102,00	116,00	116,00	111,33
	-12,50	105,00	107,00	103,00	105,00	103,00	110,00	110,00	107,67
	-12,25	101,00	103,00	99,00	101,00	110,00	108,00	108,00	108,67
	-12,00	97,60	99,60	95,60	97,60	105,00	103,00	105,00	104,33
	-11,75	94,50	96,50	92,50	94,50	105,00	113,00	100,00	106,00
	-11,50	89,20	91,20	87,20	89,20	103,00	116,00	103,00	107,33
	-11,25	94,50	96,50	92,50	94,50	110,00	110,00	102,00	107,33
	-11,00	91,60	93,60	89,60	91,60	110,00	108,00	110,00	109,33
	-10,75	84,30	86,30	82,30	84,30	116,00	108,00	113,00	112,33
	-10,50	89,60	91,60	87,60	89,60	118,00	105,00	116,00	113,00
	-10,25	84,30	86,30	82,30	84,30	110,00	103,00	118,00	110,33
	-10,00	83,60	85,60	81,60	83,60	105,00	110,00	110,00	108,33
	-9,75	82,20	84,20	80,20	82,20	105,00	105,00	108,00	106,00
	-9,50	80,50	82,50	78,50	80,50	106,00	108,00	102,00	105,33
	-9,25	82,20	84,20	80,20	82,20	102,00	110,00	108,00	106,67
	-9,00	78,80	80,80	76,80	78,80	108,00	110,00	108,00	108,67
	-8,75	75,70	77,70	73,70	75,70	110,00	119,00	110,00	113,00
	-8,50	76,60	78,60	74,60	76,60	116,00	108,00	113,00	112,33
	-8,25	75,70	77,70	73,70	75,70	113,00	110,00	110,00	111,00
	-8,00	74,20	76,20	72,20	74,20	110,00	108,00	119,00	112,33
	-7,75	72,70	74,70	70,70	72,70	105,00	105,00	108,00	106,00
	-7,50	71,00	73,00	69,00	71,00	105,00	103,00	102,00	103,33
	-7,25	72,20	74,20	70,20	72,20	100,00	108,00	93,20	100,40
	-7,00	71,00	73,00	69,00	71,00	110,00	100,00	102,00	104,00
	-6,75	68,60	70,60	66,60	68,60	98,00	103,00	102,00	101,00
	-6,50	62,40	64,40	60,40	62,40	98,00	97,60	103,00	99,53
	-6,25	67,00	69,00	65,00	67,00	91,60	89,60	96,70	92,63
	-6,00	66,00	68,00	64,00	66,00	93,60	92,80	103,00	96,47
	-5,75	66,00	68,00	64,00	66,00	94,00	93,60	92,00	93,20
	-5,50	65,40	67,40	63,40	65,40	91,60	87,90	87,60	89,03
	-5,25	64,00	66,00	62,00	64,00	85,80	97,60	85,60	89,67
	-5,00	63,60	65,60	61,60	63,60	84,00	82,20	84,80	83,67
	-4,75	64,00	66,00	62,00	64,00	82,20	85,80	82,20	83,40
	-4,50	63,60	65,60	61,60	63,60	82,70	77,20	79,20	79,70
	-4,25	65,40	67,40	63,40	65,40	82,20	77,20	79,20	79,53
	-4,00	67,50	69,50	65,50	67,50	77,20	78,80	78,80	78,27
	-3,75	65,40	67,40	63,40	65,40	78,80	74,20	77,20	76,73
	-3,50	64,30	66,30	62,30	64,30	77,20	77,20	72,70	75,70
	-3,25	65,40	67,40	63,40	65,40	75,70	77,20	78,80	77,23
	-3,00	67,30	69,30	65,30	67,30	77,20	74,20	72,70	74,70
	-2,75	69,90	71,90	67,90	69,90	78,20	74,20	77,20	76,53
	-2,50	72,70	74,70	70,70	72,70	77,20	77,20	72,70	75,70
	-2,25	77,90	79,90	75,90	77,90	75,70	74,20	74,60	74,83
	-2,00	79,20	81,20	77,20	79,20	77,00	78,80	83,20	79,67
	-1,75	75,10	77,10	73,10	75,10	77,20	77,20	83,20	79,20
	-1,50	75,40	77,40	73,40	75,40	80,20	74,20	82,20	78,87
	-1,25	75,10	77,10	73,10	75,10	84,00	87,60	85,40	85,67
SAIS5	-1,00	75,40	77,40	73,40	75,40	80,20	87,60	77,20	81,67
	-0,75	75,10	77,10	73,10	75,10	80,50	86,50	77,20	81,40
	-0,50	75,40	77,40	73,40	75,40	78,80	84,70	81,50	81,67
	-0,25	75,10	77,10	73,10	75,10	78,80	80,20	74,20	77,73
	0,00	77,00	79,00	75,00	77,00	75,70	77,20	80,50	77,80

**Tabla E.3.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 5 y 6 h. Flanco izquierdo.



S-AISI5	0,00	77,00	79,00	75,00	77,00	75,70	77,20	80,50	77,80
	0,25	78,00	80,00	76,00	78,00	87,60	85,40	98,00	90,33
	0,50	77,20	79,20	75,20	77,20	77,20	87,60	84,00	82,93
	0,75	75,10	77,10	73,10	75,10	84,00	87,60	95,60	89,07
	1,00	72,70	74,70	70,70	72,70	87,60	75,70	85,80	83,03
L-3453 T6 (flanco derecho)	1,25	74,00	76,00	72,00	74,00	87,60	86,10	85,40	86,37
	1,50	75,10	77,10	73,10	75,10	88,00	86,10	85,40	86,50
	1,75	74,00	76,00	72,00	74,00	84,00	84,00	88,00	85,33
	2,00	75,10	77,10	73,10	75,10	85,80	84,00	85,80	85,20
	2,25	74,00	76,00	72,00	74,00	84,00	87,30	88,40	86,57
	2,50	75,10	77,10	73,10	75,10	84,00	82,20	85,00	83,73
	2,75	70,60	72,60	68,60	70,60	80,20	84,00	85,80	83,33
	3,00	72,20	74,20	70,20	72,20	81,80	84,30	85,80	83,97
	3,25	75,60	77,60	73,60	75,60	82,80	84,30	85,80	84,30
	3,50	77,70	79,70	75,70	77,70	85,40	84,00	90,00	86,47
	3,75	78,90	80,90	76,90	78,90	82,80	82,20	83,20	82,73
	4,00	77,20	79,20	75,20	77,20	84,00	80,50	85,80	83,43
	4,25	75,60	77,60	73,60	75,60	82,80	80,70	84,00	82,50
	4,50	80,80	82,80	78,80	80,80	80,50	84,00	82,20	82,23
	4,75	75,60	77,60	73,60	75,60	80,50	82,80	90,00	84,43
	5,00	76,30	78,30	74,30	76,30	84,00	82,50	88,20	84,90
	5,25	79,00	81,00	77,00	79,00	82,80	82,00	87,60	84,13
	5,50	80,70	82,70	78,70	80,70	84,00	87,60	83,60	85,07
	5,75	82,90	84,90	80,90	82,90	90,80	84,00	84,00	86,27
	6,00	85,90	87,90	83,90	85,90	87,60	84,00	83,60	85,07
	6,25	80,70	82,70	78,70	80,70	88,20	84,00	87,60	86,60
	6,50	87,20	89,20	85,20	87,20	88,20	87,60	84,00	86,60
	6,75	89,00	91,00	87,00	89,00	89,20	90,80	84,30	88,10
	7,00	87,20	89,20	85,20	87,20	88,80	93,60	82,20	88,20
	7,25	92,20	94,20	90,20	92,20	92,00	95,80	90,80	92,87
	7,50	94,20	96,20	92,20	94,20	99,40	99,40	87,60	95,47
	7,75	89,00	91,00	87,00	89,00	97,60	102,00	93,60	97,73
	8,00	91,50	93,50	89,50	91,50	89,60	99,40	95,80	94,93
	8,25	90,80	92,80	88,80	90,80	90,00	103,00	95,80	96,27
	8,50	90,80	92,80	88,80	90,80	95,30	98,90	100,00	98,07
	8,75	92,50	94,50	90,50	92,50	97,30	100,00	103,00	100,10
	9,00	93,00	95,00	91,00	93,00	97,60	103,00	105,00	101,87
	9,25	93,00	95,00	91,00	93,00	104,00	105,00	105,00	104,67
	9,50	93,00	95,00	91,00	93,00	102,00	108,00	103,00	104,33
	9,75	95,60	97,60	93,60	95,60	100,00	102,00	100,00	100,67
	10,00	98,20	100,20	96,20	98,20	99,80	100,00	108,00	102,60
	10,25	100,80	102,80	98,80	100,80	100,00	103,00	108,00	103,67
	10,50	99,50	101,50	97,50	99,50	102,00	102,00	102,00	102,00
	10,75	99,50	101,50	97,50	99,50	103,00	105,00	103,00	103,67
	11,00	96,60	98,60	94,60	96,60	102,00	105,00	105,00	104,00
	11,25	99,50	101,50	97,50	99,50	108,00	103,00	100,00	103,67
	11,50	100,80	102,80	98,80	100,80	105,00	105,00	100,00	103,33
	11,75	105,00	107,00	103,00	105,00	102,00	105,00	102,00	103,00
	12,00	100,00	102,00	98,00	100,00	103,00	100,00	105,00	102,67
	12,25	101,00	103,00	99,00	101,00	100,00	100,00	108,00	102,67
	12,50	105,00	107,00	103,00	105,00	102,00	102,00	105,00	103,00
	12,75	101,00	103,00	99,00	101,00	105,00	108,00	105,00	106,00
	13,00	105,00	107,00	103,00	105,00	105,00	105,00	108,00	106,00

**Tabla E.4.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 5 y 6 h. Flanco derecho.





	r (mm)	P33 - P34				P35 - P36			
		150°C 7h				150°C 8h			
		HV1	HV2	HV3	Media	HV1	HV2	HV3	Media
L-2653 T6 (flanco izquierdo)	-13,00	108,00	106,70	109,30	108,00	116,00	114,80	117,20	116,00
	-12,75	105,00	103,70	106,30	105,00	108,00	106,80	109,20	108,00
	-12,50	103,00	101,70	104,30	103,00	110,00	108,80	111,20	110,00
	-12,25	108,00	106,70	109,30	108,00	110,00	108,80	111,20	110,00
	-12,00	110,00	108,70	111,30	110,00	108,00	106,80	109,20	108,00
	-11,75	102,00	100,70	103,30	102,00	105,00	103,80	106,20	105,00
	-11,50	108,00	106,70	109,30	108,00	103,00	101,80	104,20	103,00
	-11,25	108,00	106,70	109,30	108,00	102,00	100,80	103,20	102,00
	-11,00	105,00	103,70	106,30	105,00	103,00	101,80	104,20	103,00
	-10,75	103,00	101,70	104,30	103,00	110,00	108,80	111,20	110,00
	-10,50	113,00	111,70	114,30	113,00	105,00	103,80	106,20	105,00
	-10,25	110,00	108,70	111,30	110,00	116,00	114,80	117,20	116,00
	-10,00	108,00	106,70	109,30	108,00	110,00	108,80	111,20	110,00
	-9,75	102,00	100,70	103,30	102,00	108,00	106,80	109,20	108,00
	-9,50	99,80	98,50	101,10	99,80	105,00	103,80	106,20	105,00
	-9,25	82,40	81,10	83,70	82,40	102,00	100,80	103,20	102,00
	-9,00	86,50	85,20	87,80	86,50	101,00	99,80	102,20	101,00
	-8,75	82,40	81,10	83,70	82,40	98,20	97,00	99,40	98,20
	-8,50	84,00	82,70	85,30	84,00	94,80	93,60	96,00	94,80
	-8,25	84,60	83,30	85,90	84,60	88,60	87,40	89,80	88,60
	-8,00	83,20	81,90	84,50	83,20	79,20	78,00	80,40	79,20
	-7,75	84,00	82,70	85,30	84,00	90,50	89,30	91,70	90,50
	-7,50	83,20	81,90	84,50	83,20	87,40	86,20	88,60	87,40
	-7,25	84,00	82,70	85,30	84,00	84,00	82,80	85,20	84,00
	-7,00	85,40	84,10	86,70	85,40	82,90	81,70	84,10	82,90
	-6,75	86,40	85,10	87,70	86,40	84,00	82,80	85,20	84,00
	-6,50	85,40	84,10	86,70	85,40	84,00	82,80	85,20	84,00
	-6,25	86,10	84,80	87,40	86,10	82,90	81,70	84,10	82,90
	-6,00	87,60	86,30	88,90	87,60	86,50	85,30	87,70	86,50
	-5,75	86,10	84,80	87,40	86,10	84,00	82,80	85,20	84,00
	-5,50	84,00	82,70	85,30	84,00	86,50	85,30	87,70	86,50
	-5,25	85,40	84,10	86,70	85,40	90,80	89,60	92,00	90,80
	-5,00	81,50	80,20	82,80	81,50	93,60	92,40	94,80	93,60
	-4,75	83,60	82,30	84,90	83,60	84,00	82,80	85,20	84,00
	-4,50	84,00	82,70	85,30	84,00	84,00	82,80	85,20	84,00
	-4,25	85,40	84,10	86,70	85,40	82,90	81,70	84,10	82,90
	-4,00	83,60	82,30	84,90	83,60	78,80	77,60	80,00	78,80
	-3,75	80,20	78,90	81,50	80,20	80,50	79,30	81,70	80,50
	-3,50	78,80	77,50	80,10	78,80	81,40	80,20	82,60	81,40
	-3,25	81,30	80,00	82,60	81,30	84,00	82,80	85,20	84,00
	-3,00	75,70	74,40	77,00	75,70	83,60	82,40	84,80	83,60
	-2,75	76,50	75,20	77,80	76,50	84,00	82,80	85,20	84,00
	-2,50	84,00	82,70	85,30	84,00	84,00	82,80	85,20	84,00
	-2,25	81,50	80,20	82,80	81,50	82,60	81,40	83,80	82,60
	-2,00	85,40	84,10	86,70	85,40	81,80	80,60	83,00	81,80
	-1,75	84,00	82,70	85,30	84,00	85,20	84,00	86,40	85,20
	-1,50	86,10	84,80	87,40	86,10	86,30	85,10	87,50	86,30
	-1,25	84,00	82,70	85,30	84,00	89,40	88,20	90,60	89,40
SAIS5	-1,00	86,10	84,80	87,40	86,10	93,60	92,40	94,80	93,60
	-0,75	84,00	82,70	85,30	84,00	91,70	90,50	92,90	91,70
	-0,50	85,60	84,30	86,90	85,60	88,40	87,20	89,60	88,40
	-0,25	85,30	84,00	86,60	85,30	84,00	82,80	85,20	84,00
	0,00	86,10	84,80	87,40	86,10	68,60	67,40	69,80	68,60

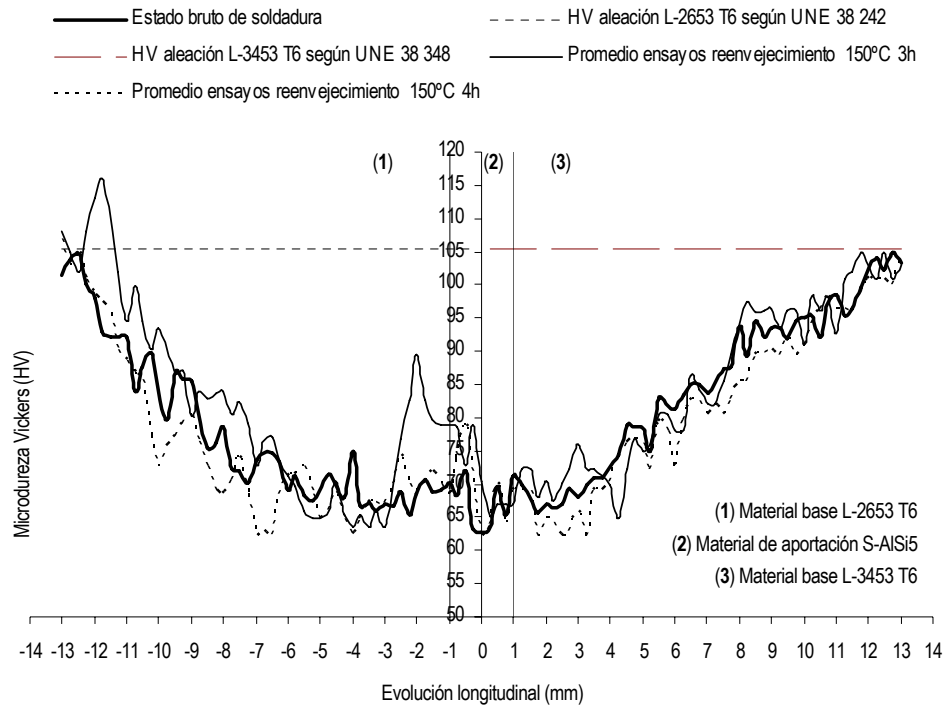
**Tabla E.5.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 7 y 8 h. Flanco izquierdo.



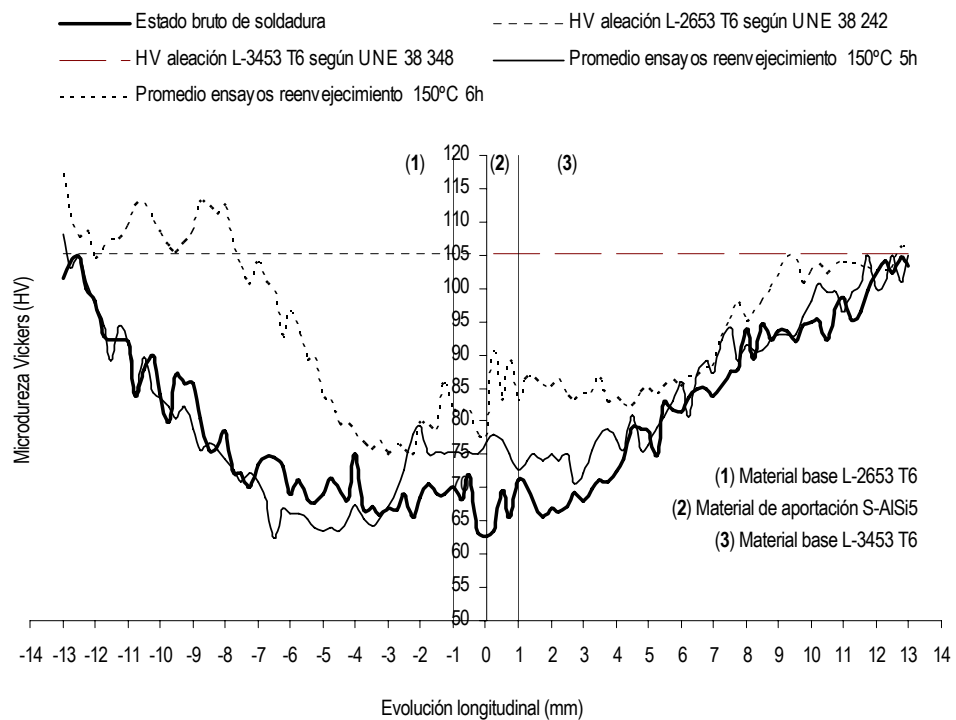
S-AISI5	0,00	86,10	84,80	87,40	86,10	68,60	67,40	69,80	68,60
	0,25	69,90	68,60	71,20	69,90	84,00	82,80	85,20	84,00
	0,50	74,80	73,50	76,10	74,80	75,10	73,90	76,30	75,10
	0,75	81,30	80,00	82,60	81,30	78,80	77,60	80,00	78,80
	1,00	88,40	87,10	89,70	88,40	77,20	76,00	78,40	77,20
L-3453 T6 (flanco derecho)	1,25	85,40	84,10	86,70	85,40	77,20	76,00	78,40	77,20
	1,50	84,00	82,70	85,30	84,00	74,80	73,60	76,00	74,80
	1,75	81,30	80,00	82,60	81,30	76,30	75,10	77,50	76,30
	2,00	77,20	75,90	78,50	77,20	77,20	76,00	78,40	77,20
	2,25	74,30	73,00	75,60	74,30	77,90	76,70	79,10	77,90
	2,50	74,80	73,50	76,10	74,80	78,20	77,00	79,40	78,20
	2,75	75,00	73,70	76,30	75,00	71,30	70,10	72,50	71,30
	3,00	63,60	62,30	64,90	63,60	72,70	71,50	73,90	72,70
	3,25	64,50	63,20	65,80	64,50	72,70	71,50	73,90	72,70
	3,50	66,70	65,40	68,00	66,70	67,30	66,10	68,50	67,30
	3,75	67,90	66,60	69,20	67,90	61,30	60,10	62,50	61,30
	4,00	68,30	67,00	69,60	68,30	57,10	55,90	58,30	57,10
	4,25	67,90	66,60	69,20	67,90	56,10	54,90	57,30	56,10
	4,50	68,30	67,00	69,60	68,30	58,30	57,10	59,50	58,30
	4,75	70,50	69,20	71,80	70,50	62,40	61,20	63,60	62,40
	5,00	71,30	70,00	72,60	71,30	64,80	63,60	66,00	64,80
	5,25	68,60	67,30	69,90	68,60	71,30	70,10	72,50	71,30
	5,50	70,50	69,20	71,80	70,50	64,80	63,60	66,00	64,80
	5,75	67,90	66,60	69,20	67,90	68,60	67,40	69,80	68,60
	6,00	68,60	67,30	69,90	68,60	63,60	62,40	64,80	63,60
	6,25	67,90	66,60	69,20	67,90	69,60	68,40	70,80	69,60
	6,50	72,40	71,10	73,70	72,40	71,00	69,80	72,20	71,00
	6,75	76,20	74,90	77,50	76,20	68,30	67,10	69,50	68,30
	7,00	78,50	77,20	79,80	78,50	69,90	68,70	71,10	69,90
	7,25	76,00	74,70	77,30	76,00	69,90	68,70	71,10	69,90
	7,50	78,50	77,20	79,80	78,50	71,30	70,10	72,50	71,30
	7,75	72,40	71,10	73,70	72,40	69,90	68,70	71,10	69,90
	8,00	76,00	74,70	77,30	76,00	71,30	70,10	72,50	71,30
	8,25	79,50	78,20	80,80	79,50	71,30	70,10	72,50	71,30
	8,50	78,60	77,30	79,90	78,60	69,60	68,40	70,80	69,60
	8,75	81,30	80,00	82,60	81,30	72,10	70,90	73,30	72,10
	9,00	85,60	84,30	86,90	85,60	72,10	70,90	73,30	72,10
	9,25	84,00	82,70	85,30	84,00	71,60	70,40	72,80	71,60
	9,50	84,00	82,70	85,30	84,00	72,10	70,90	73,30	72,10
	9,75	85,60	84,30	86,90	85,60	68,30	67,10	69,50	68,30
	10,00	87,60	86,30	88,90	87,60	71,60	70,40	72,80	71,60
	10,25	85,60	84,30	86,90	85,60	72,10	70,90	73,30	72,10
	10,50	84,00	82,70	85,30	84,00	72,10	70,90	73,30	72,10
	10,75	84,00	82,70	85,30	84,00	69,90	68,70	71,10	69,90
	11,00	87,60	86,30	88,90	87,60	77,20	76,00	78,40	77,20
	11,25	85,70	84,40	87,00	85,70	75,40	74,20	76,60	75,40
	11,50	84,10	82,80	85,40	84,10	71,30	70,10	72,50	71,30
	11,75	80,30	79,00	81,60	80,30	72,10	70,90	73,30	72,10
	12,00	77,20	75,90	78,50	77,20	75,40	74,20	76,60	75,40
	12,25	80,30	79,00	81,60	80,30	77,20	76,00	78,40	77,20
	12,50	77,20	75,90	78,50	77,20	71,60	70,40	72,80	71,60
	12,75	78,90	77,60	80,20	78,90	77,20	76,00	78,40	77,20
	13,00	80,80	79,50	82,10	80,80	77,20	76,00	78,40	77,20

**Tabla E.6.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 7 y 8 h. Flanco derecho.



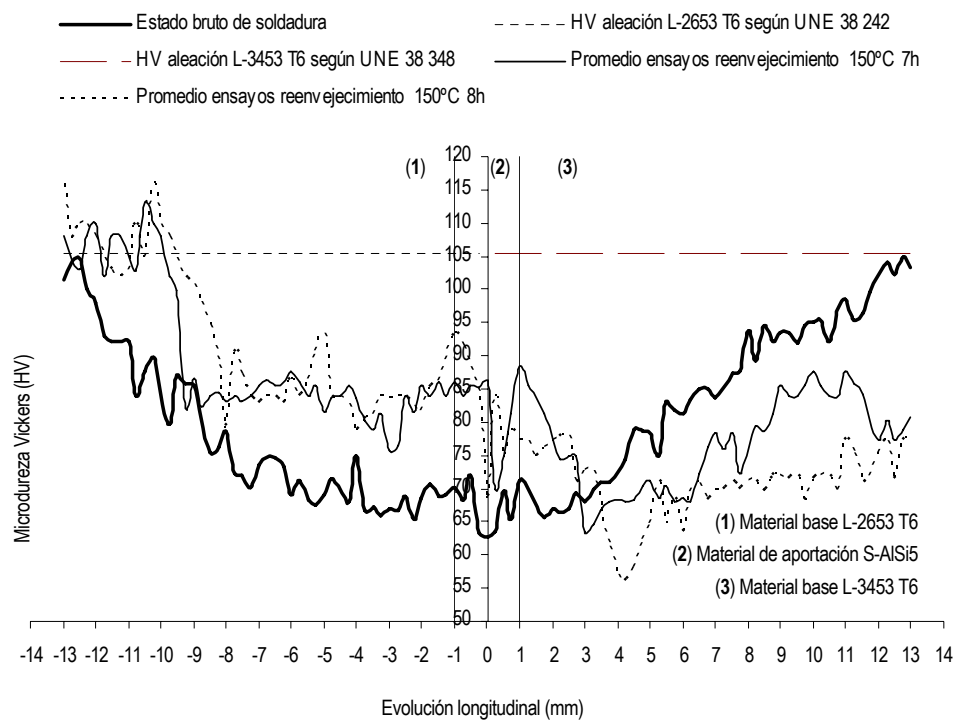


**Fig. E.1.** Evolución longitudinal de la microdureza Vickers para aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T6 unidas mediante soldadura con material de aportación S-AlSi5 con almacenamiento térmico adicional a 150°C durante 3 y 4 h. Propiedades no afectadas después del tratamiento térmico. HB = 0.95 HV.



**Fig. E.2.** Evolución longitudinal de la microdureza Vickers para aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T6 unidas mediante soldadura con material de aportación S-AlSi5 con almacenamiento térmico adicional a 150°C durante 5 y 6 h. Propiedades no afectadas después del tratamiento térmico. Recuperación de propiedades para el ensayo a 6 h. HB = 0.95 HV.





**Fig. E.3.** Evolución longitudinal de la microdureza Vickers para aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T6 unidas mediante soldadura con material de aportación S-AISI5 con almacenamiento térmico adicional a 150°C durante 6 y 7 h. Sobreenvejecimiento progresivo de la aleación L-3453 T6 a partir de las 6 h. HB = 0.95 HV.



	r (mm)	P31 - P32				P43-44			
		150°C 6h				150°C 6h			
		HV1	HV2	HV3	Media	HV1	HV2	HV3	Media
L-2653 T6 (flanco izquierdo)	-13,00	116,00	118,00	118,00	117,33	113,00	119,00	116,00	116,00
	-12,75	102,00	116,00	116,00	111,33	116,00	101,00	113,00	110,00
	-12,50	103,00	110,00	110,00	107,67	110,00	105,00	105,00	106,67
	-12,25	110,00	108,00	108,00	108,67	105,00	103,00	110,00	106,00
	-12,00	105,00	103,00	105,00	104,33	102,00	106,00	116,00	108,00
	-11,75	105,00	113,00	100,00	106,00	116,00	100,00	101,00	105,67
	-11,50	103,00	116,00	103,00	107,33	102,00	98,90	106,00	102,30
	-11,25	110,00	110,00	102,00	107,33	103,00	101,00	108,00	104,00
	-11,00	110,00	108,00	110,00	109,33	105,00	105,00	110,00	106,67
	-10,75	116,00	108,00	113,00	112,33	105,00	108,00	101,00	104,67
	-10,50	118,00	105,00	116,00	113,00	108,00	110,00	105,00	107,67
	-10,25	110,00	103,00	118,00	110,33	108,00	101,00	105,00	104,67
	-10,00	105,00	110,00	110,00	108,33	110,00	105,00	110,00	108,33
	-9,75	105,00	105,00	108,00	106,00	113,00	108,00	110,00	110,33
	-9,50	106,00	108,00	102,00	105,33	105,00	106,00	105,00	105,33
	-9,25	102,00	110,00	108,00	106,67	105,00	110,00	106,00	107,00
	-9,00	108,00	110,00	108,00	108,67	104,00	113,00	104,00	107,00
	-8,75	110,00	119,00	110,00	113,00	113,00	116,00	113,00	114,00
	-8,50	116,00	108,00	113,00	112,33	113,00	119,00	113,00	115,00
	-8,25	113,00	110,00	110,00	111,00	99,80	110,00	99,80	103,20
	-8,00	110,00	108,00	119,00	112,33	95,80	101,00	95,80	97,53
	-7,75	105,00	105,00	108,00	106,00	94,10	113,00	94,10	100,40
	-7,50	105,00	103,00	102,00	103,33	101,00	116,00	101,00	106,00
	-7,25	100,00	108,00	93,20	100,40	98,00	101,00	98,00	99,00
	-7,00	110,00	100,00	102,00	104,00	91,20	113,00	91,20	98,47
	-6,75	98,00	103,00	102,00	101,00	90,40	98,00	90,40	92,93
	-6,50	98,00	97,60	103,00	99,53	89,20	106,00	89,20	94,80
	-6,25	91,60	89,60	96,70	92,63	87,60	99,80	87,60	91,67
	-6,00	93,60	92,80	103,00	96,47	85,80	98,50	85,80	90,03
	-5,75	94,00	93,60	92,00	93,20	90,80	91,20	90,80	90,93
	-5,50	91,60	87,90	87,60	89,03	85,00	95,80	85,00	88,60
	-5,25	85,80	97,60	85,60	89,67	85,80	90,00	85,80	87,20
	-5,00	84,00	82,20	84,80	83,67	84,00	82,80	84,00	83,60
	-4,75	82,20	85,80	82,20	83,40	88,00	85,80	88,00	87,27
	-4,50	82,70	77,20	79,20	79,70	82,50	90,80	82,50	85,27
	-4,25	82,20	77,20	79,20	79,53	86,10	87,30	96,10	89,83
	-4,00	77,20	78,80	78,80	78,27	84,70	84,00	84,70	84,47
	-3,75	78,80	74,20	77,20	76,73	89,60	85,00	89,60	88,07
	-3,50	77,20	77,20	72,70	75,70	87,60	82,90	87,60	86,03
	-3,25	75,70	77,20	78,80	77,23	89,20	84,00	89,20	87,47
	-3,00	77,20	74,20	72,70	74,70	79,20	89,60	79,20	82,67
	-2,75	78,20	74,20	77,20	76,53	85,40	90,00	85,40	86,93
	-2,50	77,20	77,20	72,70	75,70	87,60	85,20	87,60	86,80
	-2,25	75,70	74,20	74,60	74,83	82,50	85,40	82,50	83,47
	-2,00	77,00	78,80	83,20	79,67	77,20	74,20	77,20	76,20
	-1,75	77,20	77,20	83,20	79,20	91,60	77,20	91,60	86,80
	-1,50	80,20	74,20	82,20	78,87	94,50	91,60	94,50	93,53
	-1,25	84,00	87,60	85,40	85,67	91,60	97,10	91,60	93,43
SAIS5	-1,00	80,20	87,60	77,20	81,67	97,60	97,10	97,60	97,43
	-0,75	80,50	86,50	77,20	81,40	80,50	103,00	80,50	88,00
	-0,50	78,80	84,70	81,50	81,67	95,80	95,80	95,80	95,80
	-0,25	78,80	80,20	74,20	77,73	95,80	95,80	95,80	95,80
	0,00	75,70	77,20	80,50	77,80	75,10	74,20	80,20	76,50

Tabla E.7. Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 6 h. Flanco izquierdo.



S-AISI5	0,00	75,70	77,20	80,50	77,80	75,10	74,20	80,20	76,50
	0,25	87,60	85,40	98,00	90,33	87,60	91,60	77,20	85,47
	0,50	77,20	87,60	84,00	82,93	95,80	91,60	87,60	91,67
	0,75	84,00	87,60	95,60	89,07	85,80	86,90	86,50	86,40
	1,00	87,60	75,70	85,80	83,03	87,60	87,60	91,60	88,93
L-3453 T6 (flanco derecho)	1,25	87,60	86,10	85,40	86,37	82,20	84,70	87,60	84,83
	1,50	88,00	86,10	85,40	86,50	86,90	84,00	89,60	86,83
	1,75	84,00	84,00	88,00	85,33	85,80	85,80	89,60	87,07
	2,00	85,80	84,00	85,80	85,20	84,70	80,50	77,20	80,80
	2,25	84,00	87,30	88,40	86,57	78,80	86,90	77,20	80,97
	2,50	84,00	82,20	85,00	83,73	75,20	69,70	84,70	76,53
	2,75	80,20	84,00	85,80	83,33	72,70	84,30	77,20	78,07
	3,00	81,80	84,30	85,80	83,97	74,20	72,70	88,00	78,30
	3,25	82,80	84,30	85,80	84,30	77,20	88,00	75,70	80,30
	3,50	85,40	84,00	90,00	86,47	79,20	75,70	80,50	78,47
	3,75	82,80	82,20	83,20	82,73	84,30	88,00	87,60	86,63
	4,00	84,00	80,50	85,80	83,43	85,80	80,50	87,50	84,60
	4,25	82,80	80,70	84,00	82,50	88,00	84,30	84,00	85,43
	4,50	80,50	84,00	82,20	82,23	87,60	87,60	82,20	85,80
	4,75	80,50	82,80	90,00	84,43	93,20	88,00	89,60	90,27
	5,00	84,00	82,50	88,20	84,90	94,10	90,80	85,80	90,23
	5,25	82,80	82,00	87,60	84,13	91,60	96,20	89,60	92,47
	5,50	84,00	87,60	83,60	85,07	94,10	93,60	93,60	93,77
	5,75	90,80	84,00	84,00	86,27	94,10	102,00	95,30	97,13
	6,00	87,60	84,00	83,60	85,07	96,20	101,00	95,80	97,67
	6,25	88,20	84,00	87,60	86,60	95,60	100,00	95,80	97,13
	6,50	88,20	87,60	84,00	86,60	101,00	98,00	99,40	99,47
	6,75	89,20	90,80	84,30	88,10	96,20	98,90	99,80	98,30
	7,00	88,80	93,60	82,20	88,20	98,90	96,20	101,00	98,70
	7,25	92,00	95,80	90,80	92,87	95,00	96,20	99,40	96,87
	7,50	99,40	99,40	87,60	95,47	100,00	98,00	99,40	99,13
	7,75	97,60	102,00	93,60	97,73	98,00	93,60	105,00	98,87
	8,00	89,60	99,40	95,80	94,93	95,80	98,00	99,80	97,87
	8,25	90,00	103,00	95,80	96,27	103,00	100,00	105,00	102,67
	8,50	95,30	98,90	100,00	98,07	98,00	102,00	105,00	101,67
	8,75	97,30	100,00	103,00	100,10	103,00	100,00	102,00	101,67
	9,00	97,60	103,00	105,00	101,87	98,00	101,00	105,00	101,33
	9,25	104,00	105,00	105,00	104,67	98,50	96,20	105,00	99,90
	9,50	102,00	108,00	103,00	104,33	98,00	101,00	105,00	101,33
	9,75	100,00	102,00	100,00	100,67	101,00	105,00	102,00	102,67
	10,00	99,80	100,00	108,00	102,60	102,00	103,00	103,00	102,67
	10,25	100,00	103,00	108,00	103,67	103,00	105,00	105,00	104,33
	10,50	102,00	102,00	102,00	102,00	105,00	103,00	99,80	102,60
	10,75	103,00	105,00	103,00	103,67	102,00	101,00	99,50	100,83
	11,00	102,00	105,00	105,00	104,00	100,00	98,00	105,00	101,00
	11,25	108,00	103,00	100,00	103,67	105,00	103,00	101,00	103,00
	11,50	105,00	105,00	100,00	103,33	103,00	108,00	101,00	104,00
	11,75	102,00	105,00	102,00	103,00	105,00	103,00	101,00	103,00
	12,00	103,00	100,00	105,00	102,67	105,00	108,00	102,00	105,00
	12,25	100,00	100,00	108,00	102,67	103,00	105,00	101,00	103,00
	12,50	102,00	102,00	105,00	103,00	105,00	103,00	101,00	103,00
	12,75	105,00	108,00	105,00	106,00	102,00	105,00	103,00	103,33
	13,00	105,00	105,00	108,00	106,00	105,00	108,00	103,00	105,33

**Tabla E.8.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 6 h. Flanco derecho.



	r (mm)	P45 - P46				P47-48			
		150°C 6h				150°C 6h			
		HV1	HV2	HV3	Media	HV1	HV2	HV3	Media
L-2653 T6 (flanco izquierdo)	-13,00	116,00	113,00	110,00	113,00	110,00	111,00	109,00	110,00
	-12,75	113,00	110,00	113,00	112,00	110,00	111,00	109,00	110,00
	-12,50	108,00	116,00	110,00	111,33	108,00	109,00	107,00	108,00
	-12,25	110,00	108,00	105,00	107,67	105,00	106,00	104,00	105,00
	-12,00	113,00	108,00	108,00	109,67	102,00	103,00	101,00	102,00
	-11,75	106,00	105,00	108,00	106,33	103,00	104,00	102,00	103,00
	-11,50	108,00	110,00	110,00	109,33	105,00	106,00	104,00	105,00
	-11,25	105,00	113,00	105,00	107,67	101,00	102,00	100,00	101,00
	-11,00	105,00	116,00	103,00	108,00	108,00	109,00	107,00	108,00
	-10,75	108,00	105,00	100,00	104,33	110,00	111,00	109,00	110,00
	-10,50	110,00	108,00	110,00	109,33	113,00	114,00	112,00	113,00
	-10,25	113,00	106,00	105,00	108,00	116,00	117,00	115,00	116,00
	-10,00	116,00	100,00	105,00	107,00	110,00	111,00	109,00	110,00
	-9,75	108,00	110,00	106,00	108,00	108,00	109,00	107,00	108,00
	-9,50	116,00	105,00	103,00	108,00	105,00	106,00	104,00	105,00
	-9,25	113,00	105,00	110,00	109,33	116,00	117,00	115,00	116,00
	-9,00	110,00	103,00	105,00	106,00	110,00	111,00	109,00	110,00
	-8,75	108,00	102,00	105,00	105,00	105,00	106,00	104,00	105,00
	-8,50	110,00	101,00	105,00	105,33	109,00	110,00	108,00	109,00
	-8,25	116,00	108,00	108,00	110,67	110,00	111,00	109,00	110,00
	-8,00	110,00	110,00	110,00	110,00	95,60	96,60	94,60	95,60
	-7,75	108,00	113,00	113,00	111,33	94,00	95,00	93,00	94,00
	-7,50	105,00	116,00	105,00	108,67	92,20	93,20	91,20	92,20
	-7,25	105,00	113,00	105,00	107,67	89,60	90,60	88,60	89,60
	-7,00	110,00	110,00	100,00	106,67	85,60	86,60	84,60	85,60
	-6,75	110,00	113,00	110,00	111,00	84,00	85,00	83,00	84,00
	-6,50	116,00	108,00	105,00	109,67	84,00	85,00	83,00	84,00
	-6,25	116,00	108,00	100,00	108,00	84,00	85,00	83,00	84,00
	-6,00	113,00	89,60	106,00	102,87	83,40	84,40	82,40	83,40
	-5,75	95,80	100,00	99,80	98,53	82,20	83,20	81,20	82,20
	-5,50	98,50	92,00	95,80	95,43	84,00	85,00	83,00	84,00
	-5,25	95,80	95,80	100,00	97,20	82,20	83,20	81,20	82,20
	-5,00	97,60	89,20	91,60	92,80	84,00	85,00	83,00	84,00
	-4,75	91,60	93,60	88,80	91,33	89,20	90,20	88,20	89,20
	-4,50	88,80	89,20	87,30	88,43	81,80	82,80	80,80	81,80
	-4,25	87,60	88,80	93,60	90,00	77,20	78,20	76,20	77,20
	-4,00	87,60	87,60	84,00	86,40	77,20	78,20	76,20	77,20
	-3,75	87,60	87,60	88,00	87,73	78,80	79,80	77,80	78,80
	-3,50	86,60	94,50	85,80	88,97	78,80	79,80	77,80	78,80
	-3,25	84,00	87,60	87,60	86,40	82,20	83,20	81,20	82,20
	-3,00	91,60	88,00	89,20	89,60	84,70	85,70	83,70	84,70
	-2,75	82,20	91,60	90,00	87,93	84,00	85,00	83,00	84,00
	-2,50	89,60	84,00	87,60	87,07	84,00	85,00	83,00	84,00
	-2,25	89,60	82,20	91,60	87,80	82,20	83,20	81,20	82,20
	-2,00	91,60	89,20	91,60	90,80	84,00	85,00	83,00	84,00
	-1,75	87,60	89,60	88,00	88,40	88,80	89,80	87,80	88,80
	-1,50	88,80	89,20	93,60	90,53	98,90	99,90	97,90	98,90
	-1,25	91,60	87,60	91,60	90,27	92,50	93,50	91,50	92,50
SAIS5	-1,00	78,80	82,20	98,00	86,33	96,70	97,70	95,70	96,70
	-0,75	93,60	91,60	87,60	90,93	100,00	101,00	99,00	100,00
	-0,50	91,60	93,60	95,60	93,60	103,00	104,00	102,00	103,00
	-0,25	72,70	91,60	82,20	82,17	81,00	82,00	80,00	81,00
	0,00	73,90	75,90	72,70	74,17	84,00	79,50	72,20	78,57

**Tabla E.9.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 6 h. Flanco izquierdo.



S-AIS5	0,00	73,90	75,90	72,70	74,17	84,00	79,50	72,20	78,57
	0,25	78,50	72,70	77,20	76,13	88,00	84,00	80,50	84,17
	0,50	72,70	77,20	72,70	74,20	105,00	77,50	82,20	88,23
	0,75	72,40	71,30	72,70	72,13	98,90	84,00	93,60	92,17
	1,00	71,30	74,20	71,30	72,27	93,60	89,60	98,00	93,73
L-3453 T6 (flanco derecho)	1,25	75,70	77,20	75,70	76,20	92,40	88,80	90,00	90,40
	1,50	77,20	78,20	74,20	76,53	93,20	85,80	91,60	90,20
	1,75	78,20	77,20	80,20	78,53	92,40	89,20	92,00	91,20
	2,00	77,20	80,20	74,20	77,20	90,40	91,60	91,60	91,20
	2,25	80,80	80,00	78,20	79,67	89,60	89,20	92,80	90,53
	2,50	82,20	78,20	72,70	77,70	89,20	89,20	93,60	90,67
	2,75	84,00	84,60	84,60	84,40	93,20	84,00	88,80	88,67
	3,00	86,50	87,60	75,70	83,27	90,10	93,20	93,60	92,30
	3,25	87,60	89,20	84,00	86,93	89,30	84,00	88,60	87,30
	3,50	88,80	89,20	80,20	86,07	88,50	85,80	87,60	87,30
	3,75	89,20	88,40	84,00	87,20	87,70	85,80	84,00	85,83
	4,00	88,80	88,20	84,20	87,07	86,90	84,00	88,40	86,43
	4,25	89,60	84,00	82,20	85,27	86,10	84,00	88,80	86,30
	4,50	88,80	82,20	85,00	85,33	85,30	82,50	84,00	83,93
	4,75	89,60	84,00	85,00	86,20	84,50	82,90	84,00	83,80
	5,00	95,30	88,20	87,60	90,37	83,70	83,60	80,50	82,60
	5,25	94,50	90,00	85,80	90,10	82,90	79,80	84,00	82,23
	5,50	89,60	91,20	87,60	89,47	82,10	79,50	84,00	81,87
	5,75	91,20	90,00	90,00	90,40	81,30	77,60	82,20	80,37
	6,00	92,80	94,20	91,20	92,73	80,50	80,50	84,00	81,67
	6,25	89,60	90,00	87,60	89,07	84,00	88,00	89,80	87,27
	6,50	94,50	84,00	91,20	89,90	82,20	88,00	84,00	84,73
	6,75	96,70	98,80	96,20	97,23	88,00	88,80	89,80	88,87
	7,00	92,80	90,00	100,00	94,27	87,60	93,60	91,60	90,93
	7,25	90,00	100,00	96,20	95,40	90,00	91,60	90,00	90,53
	7,50	92,00	93,20	98,80	94,67	91,60	88,80	95,80	92,07
	7,75	93,20	99,80	102,00	98,33	94,90	95,80	96,70	95,80
	8,00	94,90	98,00	98,80	97,23	95,80	88,80	89,20	91,27
	8,25	96,20	98,00	99,80	98,00	96,70	84,00	98,00	92,90
	8,50	98,00	100,00	101,00	99,67	98,00	89,60	82,20	89,93
	8,75	105,00	96,70	100,00	100,57	96,70	91,60	95,80	94,70
	9,00	100,00	103,00	102,00	101,67	98,00	94,60	103,00	98,53
	9,25	101,00	101,00	103,00	101,67	100,00	95,80	101,00	98,93
	9,50	102,00	100,00	105,00	102,33	101,00	101,00	100,00	100,67
	9,75	103,00	101,00	101,00	101,67	98,00	102,00	105,00	101,67
	10,00	100,00	105,00	102,00	102,33	98,80	101,00	103,00	100,93
	10,25	101,00	108,00	100,00	103,00	99,80	100,00	100,00	99,93
	10,50	102,00	101,00	99,80	100,93	101,00	100,00	98,80	99,93
	10,75	100,00	100,00	100,00	100,00	102,00	101,00	101,00	101,33
	11,00	101,00	99,80	105,00	101,93	101,00	102,00	105,00	102,67
	11,25	102,00	99,80	102,00	101,27	100,00	103,00	102,00	101,67
	11,50	105,00	100,00	103,00	102,67	103,00	105,00	101,00	103,00
	11,75	102,00	102,00	102,00	102,00	105,00	108,00	103,00	105,33
	12,00	105,00	105,00	101,00	103,67	108,00	105,00	101,00	104,67
	12,25	101,00	100,00	100,00	100,33	108,00	105,00	100,00	104,33
	12,50	101,00	103,00	100,00	101,33	105,00	108,00	105,00	106,00
	12,75	100,00	103,00	101,00	101,33	102,00	105,00	102,00	103,00
	13,00	105,00	105,00	101,00	103,67	108,00	108,00	103,00	106,33

**Tabla E.10.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 6 h. Flanco derecho.





	r (mm)	P49 - P50 150°C 6h				Media ensayos	Pérdida dureza HV %	Estado bruto Media	Pérdida bruto %
		HV1	HV2	HV3	Media				
L-2653 T6 (flanco izquierdo)	-13,00	110,00	108,00	109,00	109,00	113,07	0,00	101,43	3,67
	-12,75	101,00	99,00	100,00	100,00	108,67	0,00	103,90	1,33
	-12,50	110,00	108,00	109,00	109,00	108,53	0,00	104,63	0,63
	-12,25	113,00	111,00	112,00	112,00	107,87	0,00	100,03	5,00
	-12,00	108,00	106,00	107,00	107,00	106,20	0,00	98,00	6,93
	-11,75	105,00	103,00	104,00	104,00	105,00	0,28	92,83	11,84
	-11,50	105,00	103,00	104,00	104,00	105,59	0,00	92,13	12,50
	-11,25	102,00	100,00	101,00	101,00	104,20	1,04	92,20	12,44
	-11,00	110,00	108,00	109,00	109,00	108,20	0,00	92,03	12,60
	-10,75	101,00	99,00	100,00	100,00	106,27	0,00	83,83	20,39
	-10,50	100,00	98,00	99,00	99,00	108,40	0,00	87,73	16,68
	-10,25	101,00	99,00	100,00	100,00	107,80	0,00	89,90	14,62
	-10,00	101,00	99,00	100,00	100,00	106,73	0,00	84,17	20,07
	-9,75	102,00	100,00	101,00	101,00	106,67	0,00	79,77	24,25
	-9,50	103,00	101,00	102,00	102,00	105,13	0,16	86,97	17,41
	-9,25	105,00	103,00	104,00	104,00	108,60	0,00	85,67	18,65
	-9,00	102,00	100,00	101,00	101,00	106,53	0,00	85,57	18,74
	-8,75	101,00	99,00	100,00	100,00	107,40	0,00	80,37	23,68
	-8,50	101,00	99,00	100,00	100,00	108,33	0,00	75,50	28,30
	-8,25	98,80	96,80	97,80	97,80	106,53	0,00	76,33	27,51
	-8,00	95,80	93,80	94,80	94,80	102,05	3,08	78,63	25,32
	-7,75	90,80	88,80	89,80	89,80	100,31	4,74	72,20	31,43
	-7,50	88,80	86,80	87,80	87,80	99,60	5,41	72,10	31,53
	-7,25	84,60	82,60	83,60	83,60	96,05	8,78	70,07	33,46
	-7,00	82,20	80,20	81,20	81,20	95,19	9,60	73,57	30,14
	-6,75	84,60	82,60	83,60	83,60	94,51	10,25	74,53	29,22
	-6,50	84,00	82,00	83,00	83,00	94,20	10,54	74,53	29,22
	-6,25	83,70	81,70	82,70	82,70	91,80	12,82	73,23	30,45
	-6,00	88,80	86,80	87,80	87,80	92,11	12,52	69,10	34,38
	-5,75	82,20	80,20	81,20	81,20	89,21	15,28	71,10	32,48
	-5,50	84,00	82,00	83,00	83,00	88,01	16,42	68,17	35,26
	-5,25	82,20	80,20	81,20	81,20	87,49	16,91	67,57	35,83
	-5,00	84,00	82,00	83,00	83,00	85,41	18,89	68,97	34,50
	-4,75	84,60	82,60	83,60	83,60	86,96	17,42	71,47	32,13
	-4,50	84,00	82,00	83,00	83,00	83,64	20,57	69,83	33,68
	-4,25	82,20	80,20	81,20	81,20	83,55	20,65	68,13	35,30
	-4,00	83,20	81,20	82,20	82,20	81,71	22,41	75,03	28,74
	-3,75	82,20	80,20	81,20	81,20	82,51	21,65	66,63	36,72
	-3,50	80,50	78,50	79,50	79,50	81,80	22,32	67,13	36,25
	-3,25	82,20	80,20	81,20	81,20	82,90	21,27	65,87	37,45
	-3,00	79,20	77,20	78,20	78,20	81,97	22,15	66,93	36,44
	-2,75	78,80	76,80	77,80	77,80	82,64	21,52	66,70	36,66
	-2,50	78,80	76,80	77,80	77,80	82,27	21,87	68,93	34,54
	-2,25	77,60	75,60	76,60	76,60	80,98	23,10	65,47	37,83
	-2,00	83,60	81,60	82,60	82,60	82,65	21,51	68,60	34,85
	-1,75	87,60	85,60	86,60	86,60	85,96	18,37	70,60	32,95
	-1,50	89,60	87,60	88,60	88,60	90,09	14,45	68,90	34,57
	-1,25	84,30	82,30	83,30	83,30	89,03	15,45	69,10	34,38
S-AISI5	-1,00	89,60	87,60	88,60	88,60	90,15	14,39	70,07	33,46
	-0,75	85,80	83,80	84,80	84,80	89,03	15,45	68,23	35,20
	-0,50	85,80	83,80	84,80	84,80	91,77	12,85	71,97	31,66
	-0,25	80,10	78,10	79,10	79,10	83,16	21,03	63,27	39,92
	0,00	72,40	73,20	71,60	72,40	75,89	27,93	62,80	40,36

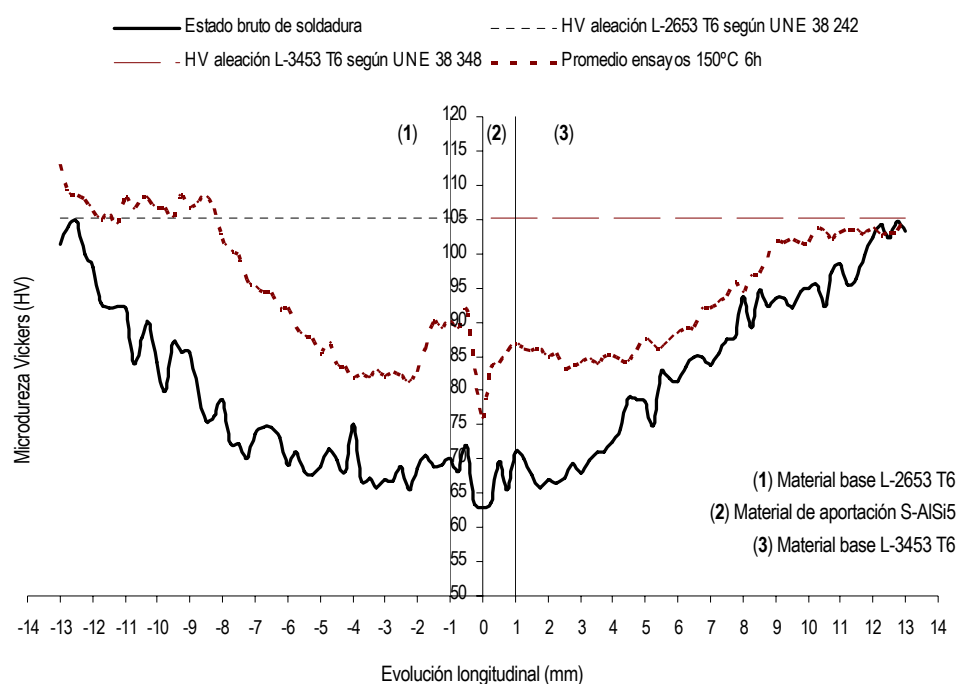
**Tabla E.11.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 6 h. Flanco izquierdo. Resultados de la ganancia obtenida por huella Vickers realizada.



S-AIS5	0,00	72,40	73,20	71,60	72,40	75,89	27,93	62,80	40,36
	0,25	80,20	81,00	79,40	80,20	83,26	20,93	63,53	39,66
	0,50	82,20	83,00	81,40	82,20	83,85	20,37	69,53	33,97
	0,75	88,80	89,60	88,00	88,80	85,71	18,60	65,50	37,80
	1,00	95,80	96,60	95,00	95,80	86,75	17,61	71,10	32,48
L-3453 T6 (flanco derecho)	1,25	92,20	93,00	91,40	92,20	86,00	18,33	70,00	33,52
	1,50	89,60	90,40	88,80	89,60	85,93	18,39	67,70	35,71
	1,75	88,60	89,40	87,80	88,60	86,15	18,19	65,70	37,61
	2,00	89,60	90,40	88,80	89,60	84,80	19,47	67,03	36,34
	2,25	88,60	89,40	87,80	88,60	85,27	19,03	66,50	36,85
	2,50	87,60	88,40	86,80	87,60	83,25	20,94	67,10	36,28
	2,75	84,20	85,00	83,40	84,20	83,73	20,48	69,27	34,22
	3,00	82,20	83,00	81,40	82,20	84,01	20,22	68,00	35,42
	3,25	84,00	84,80	83,20	84,00	84,57	19,69	69,83	33,68
	3,50	80,20	81,00	79,40	80,20	83,70	20,51	71,03	32,54
	3,75	82,20	83,00	81,40	82,20	84,92	19,35	70,93	32,64
	4,00	84,00	84,80	83,20	84,00	85,11	19,18	72,47	31,18
	4,25	82,20	83,00	81,40	82,20	84,34	19,91	74,43	29,31
	4,50	84,00	84,80	83,20	84,00	84,26	19,98	78,93	25,04
	4,75	84,40	85,20	83,60	84,40	85,82	18,50	78,73	25,23
	5,00	89,60	90,40	88,80	89,60	87,54	16,87	78,40	25,55
	5,25	84,40	85,20	83,60	84,40	86,67	17,70	74,87	28,90
	5,50	80,20	81,00	79,40	80,20	86,07	18,26	82,77	21,40
	5,75	82,20	83,00	81,40	82,20	87,27	17,12	81,77	22,35
	6,00	84,00	84,80	83,20	84,00	88,23	16,21	81,33	22,76
	6,25	85,80	86,60	85,00	85,80	89,17	15,31	83,43	20,77
	6,50	85,80	86,60	85,00	85,80	89,30	15,19	84,97	19,31
	6,75	86,00	86,80	85,20	86,00	91,70	12,92	84,90	19,37
	7,00	87,60	88,40	86,80	87,60	91,94	12,69	83,70	20,51
	7,25	88,00	88,80	87,20	88,00	92,73	11,93	85,33	18,96
	7,50	87,60	88,40	86,80	87,60	93,79	10,93	87,43	16,97
	7,75	89,20	90,00	88,40	89,20	95,99	8,84	87,77	16,65
	8,00	89,20	90,00	88,40	89,20	94,10	10,64	93,77	10,95
	8,25	93,60	94,40	92,80	93,60	96,69	8,18	89,30	15,19
	8,50	95,80	96,60	95,00	95,80	97,03	7,86	94,67	10,10
	8,75	100,00	100,80	99,20	100,00	99,41	5,60	92,23	12,41
	9,00	106,00	106,80	105,20	106,00	101,88	3,25	93,60	11,11
	9,25	103,00	103,80	102,20	103,00	101,63	3,48	93,60	11,11
	9,50	102,00	102,80	101,20	102,00	102,13	3,01	91,93	12,69
	9,75	101,00	101,80	100,20	101,00	101,53	3,58	94,50	10,26
	10,00	100,00	100,80	99,20	100,00	101,71	3,41	95,00	9,78
	10,25	108,00	108,80	107,20	108,00	103,79	1,44	95,30	9,50
	10,50	110,00	110,80	109,20	110,00	103,09	2,10	92,20	12,44
	10,75	105,00	105,80	104,20	105,00	102,17	2,98	97,27	7,63
	11,00	105,00	105,80	104,20	105,00	102,92	2,26	98,53	6,43
	11,25	108,00	108,80	107,20	108,00	103,52	1,69	95,30	9,50
	11,50	105,00	105,80	104,20	105,00	103,60	1,61	96,43	8,42
	11,75	101,00	101,80	100,20	101,00	102,87	2,31	99,67	5,35
	12,00	103,00	103,80	102,20	103,00	103,80	1,42	102,30	2,85
	12,25	103,00	103,80	102,20	103,00	102,67	2,50	104,20	1,04
	12,50	102,00	102,80	101,20	102,00	103,07	2,12	102,27	2,88
	12,75	103,00	103,80	102,20	103,00	103,33	1,87	104,77	0,51
	13,00	103,00	105,00	101,00	103,00	104,87	0,41	103,27	1,93

**Tabla E.12.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-2653 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 6 h. Flanco derecho. Resultados de la ganancia obtenida por huella Vickers realizada.





**Fig. E.4.** Evolución longitudinal de la microdureza Vickers para aleaciones L-2653 T6 y L-3453 T6 unidas mediante soldadura con material de aportación S-AISI5 después de almacenamiento térmico adicional a 150°C durante 6 h. Recuperación de propiedades en la zona de afectación térmica. HB = 0.95 HV.

		Lateral moldeado	Travesaño unión laterales
		L-2653 T6	L-3453 T6
<b>Reenvejecido</b>	Pérdida Máxima	23,1%	20,9%
	Pérdida Media	9,9%	12,1%
<b>Bruto</b>	Pérdida Máxima	39,9%	40,4%
	Pérdida Media	26,4%	20,9%
	Ganancia Relativa Media	16,5%	8,7%
	Ganancia Relativa Media Unión	12,6%	

**Tabla E.13.** Pérdida de propiedades en la zona de afectación térmica para la unión en estado bruto de soldadura y para la unión madurada 6 h a 150°C después del proceso de soldeo. Aumento de la dureza Vickers en ZAT del 12.6%.



## E.2. Unión entre aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T6

	r (mm)	P51 - P52				P53 - P54			
		150°C 6h				150°C 6h			
		HV1	HV2	HV3	Media	HV1	HV2	HV3	Media
L-3453 T6 (flanco izquierdo)	-19,00	115,00	113,00	110,00	112,67	105,00	101,00	100,00	102,00
	-18,00	113,00	110,00	108,00	110,33	102,00	105,00	104,00	103,67
	-17,00	116,00	108,00	105,00	109,67	102,00	103,00	102,00	102,33
	-16,00	115,00	105,00	103,00	107,67	105,00	102,00	101,00	102,67
	-15,00	110,00	105,00	101,00	105,33	101,00	101,00	100,00	100,67
	-14,00	113,00	110,00	105,00	109,33	103,00	105,00	104,00	104,00
	-13,00	116,00	108,00	105,00	109,67	102,00	105,00	104,00	103,67
	-12,00	115,00	113,00	108,00	112,00	98,00	94,10	93,10	95,07
	-11,75	110,00	110,00	110,00	110,00	97,10	98,80	97,80	97,90
	-11,50	108,00	105,00	105,00	106,00	96,00	94,10	93,10	94,40
	-11,25	105,00	105,00	106,00	105,33	97,10	98,60	97,60	97,77
	-11,00	105,00	105,00	106,00	105,33	96,00	91,60	90,60	92,73
	-10,75	105,00	101,00	105,00	103,67	89,80	95,70	94,70	93,40
	-10,50	108,00	103,00	101,00	104,00	93,60	91,60	90,60	91,93
	-10,25	110,00	100,00	102,00	104,00	89,80	92,20	91,20	91,07
	-10,00	113,00	98,90	101,00	104,30	84,00	87,60	86,60	86,07
	-9,75	108,00	97,60	98,80	101,47	84,60	86,90	85,90	85,80
	-9,50	105,00	95,80	95,80	98,87	84,00	85,80	84,80	84,87
	-9,25	105,00	97,10	95,80	99,30	84,80	82,20	81,20	82,73
	-9,00	98,90	93,50	95,80	96,07	82,20	80,50	79,50	80,73
	-8,75	100,00	90,40	85,80	92,07	80,50	82,20	81,20	81,30
	-8,50	91,60	84,00	85,80	87,13	80,50	80,50	79,50	80,17
	-8,25	92,00	82,20	82,20	85,47	80,50	77,20	76,20	77,97
	-8,00	88,00	80,20	82,20	83,47	77,20	72,40	71,40	73,67
	-7,75	92,00	82,20	82,20	85,47	72,40	75,60	74,60	74,20
	-7,50	85,80	80,80	82,20	82,93	74,20	77,20	76,20	75,87
	-7,25	85,80	84,00	84,00	84,60	82,80	80,20	79,20	80,73
	-7,00	84,00	74,20	84,00	80,73	88,00	85,60	84,60	86,07
	-6,75	80,80	78,80	82,20	80,60	85,60	87,50	86,50	86,53
	-6,50	80,80	78,80	82,20	80,60	84,00	85,60	84,60	84,73
	-6,25	78,80	78,80	84,00	80,53	82,80	82,40	81,40	82,20
	-6,00	77,20	77,20	84,00	79,47	80,50	82,60	81,60	81,57
	-5,75	82,20	80,20	82,20	81,53	82,80	80,60	79,60	81,00
	-5,50	84,70	82,20	82,20	83,03	85,80	82,20	81,20	83,07
	-5,25	84,00	84,00	82,20	83,40	82,80	80,40	79,40	80,87
	-5,00	84,70	84,70	82,20	83,87	85,80	82,20	81,20	83,07
	-4,75	82,90	84,00	84,00	83,63	92,80	90,80	89,80	91,13
	-4,50	75,70	80,50	84,00	80,07	93,60	89,60	88,60	90,60
	-4,25	84,00	86,30	87,60	85,97	93,60	91,60	90,60	91,93
	-4,00	75,70	84,30	87,60	82,53	93,60	91,60	90,60	91,93
	-3,75	80,20	86,90	86,90	84,67	92,80	90,80	89,80	91,13
	-3,50	84,70	86,10	86,90	85,90	88,00	91,60	90,60	90,07
	-3,25	87,60	84,30	89,60	87,17	92,80	90,80	89,80	91,13
	-3,00	95,80	80,50	89,60	88,63	98,00	91,60	90,60	93,40
	-2,75	91,60	84,30	89,60	88,50	100,00	90,80	89,80	93,53
	-2,50	91,60	87,30	89,60	89,50	105,00	91,60	90,60	95,73
	-2,25	98,00	84,00	94,90	92,30	101,00	95,40	94,40	96,93
	-2,00	91,20	84,30	94,90	90,13	101,00	98,00	97,00	98,67
	-1,75	98,00	84,00	94,50	92,17	96,30	97,10	96,10	96,50
	-1,50	98,90	88,00	94,50	93,80	95,30	95,80	94,80	95,30
	-1,25	95,80	88,80	98,00	94,20	85,00	96,30	95,30	92,20
S-AISI5	-1,00	99,80	95,80	98,00	97,87	91,60	93,60	92,60	92,60
	-0,75	106,00	92,20	97,20	98,47	74,80	82,20	81,20	79,40
	-0,50	105,00	98,00	74,20	92,40	68,30	74,20	73,20	71,90
	-0,25	82,20	84,00	77,20	81,13	72,00	72,00	71,00	71,67
	0,00	74,20	69,90	74,20	72,77	71,30	71,30	70,30	70,97

**Tabla E.14.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 6 h. Flanco izquierdo.



S-AISI5	0,00	74,20	69,90	74,20	72,77	71,30	71,30	70,30	70,97
	0,25	74,20	72,70	70,50	72,47	76,70	71,30	69,30	72,43
	0,50	77,90	69,90	77,20	75,00	74,20	78,80	76,80	76,60
	0,75	103,00	75,70	101,00	93,23	89,80	89,90	87,90	89,20
	1,00	105,00	113,00	100,00	106,00	113,00	90,40	88,40	97,27
L-3453 T6 (flanco derecho)	1,25	103,00	108,00	110,00	107,00	108,00	109,00	107,00	108,00
	1,50	105,00	108,00	103,00	105,33	105,00	105,00	103,00	104,33
	1,75	95,80	109,00	105,00	103,27	103,00	106,00	104,00	104,33
	2,00	103,00	108,00	101,00	104,00	105,00	104,00	102,00	103,67
	2,25	78,80	88,80	98,00	88,53	100,00	105,00	103,00	102,67
	2,50	77,20	85,80	92,40	85,13	98,50	108,00	106,00	104,17
	2,75	78,80	82,20	87,30	82,77	94,50	110,00	108,00	104,17
	3,00	89,20	82,20	87,10	86,17	91,50	101,00	99,00	97,17
	3,25	93,20	82,20	87,30	87,57	83,60	95,80	93,80	91,07
	3,50	94,10	84,40	89,30	89,27	77,20	90,40	88,40	85,33
	3,75	98,00	82,50	89,20	89,90	83,60	85,00	83,00	83,87
	4,00	105,00	100,00	99,80	101,60	85,80	80,20	78,20	81,40
	4,25	102,00	98,00	101,00	100,33	90,40	78,80	76,80	82,00
	4,50	107,00	105,00	105,00	105,67	91,60	80,20	78,20	83,33
	4,75	105,00	105,00	102,00	104,00	93,60	80,50	78,50	84,20
	5,00	103,00	108,00	106,00	105,67	94,10	84,00	82,00	86,70
	5,25	104,00	106,00	105,00	105,00	98,90	89,60	87,60	92,03
	5,50	107,00	105,00	105,00	105,67	105,00	92,80	90,80	96,20
	5,75	105,00	105,00	103,00	104,33	105,00	101,00	99,00	101,67
	6,00	108,00	105,00	101,00	104,67	101,00	100,00	98,00	99,67
	6,25	110,00	105,00	105,00	106,67	102,00	98,90	96,90	99,27
	6,50	101,00	106,00	108,00	105,00	102,00	100,00	98,00	100,00
	6,75	102,00	106,00	108,00	105,33	105,00	101,00	99,00	101,67
	7,00	105,00	101,00	106,00	104,00	103,00	102,00	100,00	101,67
	7,25	108,00	110,00	105,00	107,67	102,00	103,00	101,00	102,00
	7,50	107,00	108,00	105,00	106,67	105,00	105,00	103,00	104,33
	7,75	106,00	108,00	105,00	106,33	101,00	101,00	99,00	100,33
	8,00	101,00	105,00	106,00	104,00	100,00	102,00	100,00	100,67
	8,25	102,00	103,00	101,00	102,00	102,00	103,00	101,00	102,00
	8,50	105,00	101,00	102,00	102,67	100,00	102,00	100,00	100,67
	8,75	103,00	110,00	103,00	105,33	101,00	101,00	99,00	100,33
	9,00	108,00	105,00	105,00	106,00	100,00	105,00	103,00	102,67
	9,25	105,00	106,00	105,00	105,33	102,00	106,00	104,00	104,00
	9,50	108,00	106,00	103,00	105,67	105,00	102,00	100,00	102,33
	9,75	101,00	106,00	105,00	104,00	102,00	102,00	100,00	101,33
	10,00	105,00	105,00	103,00	104,33	103,00	100,00	98,00	100,33
	10,25	108,00	101,00	105,00	104,67	105,00	100,00	98,00	101,00
	10,50	108,00	105,00	106,00	106,33	101,00	103,00	101,00	101,67
	10,75	101,00	103,00	101,00	101,67	100,00	105,00	103,00	102,67
	11,00	106,00	105,00	105,00	105,33	105,00	101,00	99,00	101,67
	11,25	110,00	105,00	106,00	107,00	105,00	102,00	100,00	102,33
	11,50	110,00	108,00	105,00	107,67	102,00	105,00	103,00	103,33
	11,75	108,00	108,00	108,00	108,00	102,00	102,00	100,00	101,33
	12,00	105,00	105,00	102,00	104,00	105,00	100,00	98,00	101,00
	12,25	105,00	105,00	103,00	104,33	105,00	105,00	103,00	104,33
	12,50	106,00	106,00	105,00	105,67	103,00	103,00	101,00	102,33
	12,75	106,00	106,00	102,00	104,67	101,00	105,00	103,00	103,00
	13,00	105,00	106,00	108,00	106,33	100,00	102,00	100,00	100,67

Tabla E.15. Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 6 h. Flanco derecho.



	r (mm)	P55 - P56				P65			
		150°C 6h				150°C 6h			
		HV1	HV2	HV3	Media	HV1	HV2	HV3	Media
L-3453 T6 (flanco izquierdo)	-19,00	105,00	106,00	105,00	105,33	105,00	99,75	110,25	105,00
	-18,00	105,00	106,00	105,00	105,33	101,00	95,95	106,05	101,00
	-17,00	103,00	104,00	103,00	103,33	102,00	96,90	107,10	102,00
	-16,00	103,00	104,00	103,00	103,33	103,00	97,85	108,15	103,00
	-15,00	103,00	104,00	103,00	103,33	105,00	99,75	110,25	105,00
	-14,00	105,00	106,00	105,00	105,33	102,00	96,90	107,10	102,00
	-13,00	105,00	106,00	105,00	105,33	105,00	99,75	110,25	105,00
	-12,00	93,20	94,20	93,20	93,53	106,00	100,70	111,30	106,00
	-11,75	95,30	96,30	95,30	95,63	105,00	99,75	110,25	105,00
	-11,50	95,30	96,30	95,30	95,63	102,00	96,90	107,10	102,00
	-11,25	93,20	94,20	93,20	93,53	102,00	96,90	107,10	102,00
	-11,00	93,20	94,20	93,20	93,53	102,00	96,90	107,10	102,00
	-10,75	90,80	91,80	90,80	91,13	105,00	99,75	110,25	105,00
	-10,50	90,80	91,80	90,80	91,13	102,00	96,90	107,10	102,00
	-10,25	89,60	90,60	89,60	89,93	106,00	100,70	111,30	106,00
	-10,00	85,80	86,80	85,80	86,13	105,00	99,75	110,25	105,00
	-9,75	77,90	78,90	77,90	78,23	105,00	99,75	110,25	105,00
	-9,50	78,80	79,80	78,80	79,13	102,00	96,90	107,10	102,00
	-9,25	78,60	79,60	78,60	78,93	105,00	99,75	110,25	105,00
	-9,00	85,60	86,60	85,60	85,93	101,00	95,95	106,05	101,00
	-8,75	77,90	78,90	77,90	78,23	101,00	95,95	106,05	101,00
	-8,50	78,80	79,80	78,80	79,13	98,50	93,58	103,43	98,50
	-8,25	77,90	78,90	77,90	78,23	95,70	90,92	100,49	95,70
	-8,00	78,80	79,80	78,80	79,13	90,40	85,88	94,92	90,40
	-7,75	78,60	79,60	78,60	78,93	93,20	88,54	97,86	93,20
	-7,50	75,70	76,70	75,70	76,03	93,20	88,54	97,86	93,20
	-7,25	75,70	76,70	75,70	76,03	82,20	78,09	86,31	82,20
	-7,00	75,70	76,70	84,60	79,00	82,20	78,09	86,31	82,20
	-6,75	73,60	74,60	86,50	78,23	82,20	78,09	86,31	82,20
	-6,50	74,20	75,20	84,60	78,00	84,00	79,80	88,20	84,00
	-6,25	71,60	72,60	81,40	75,20	84,40	80,18	88,62	84,40
	-6,00	74,20	75,20	81,60	77,00	75,70	71,92	79,49	75,70
	-5,75	70,60	71,60	79,60	73,93	75,70	71,92	79,49	75,70
	-5,50	72,20	73,20	81,20	75,53	80,20	76,19	84,21	80,20
	-5,25	72,10	73,10	79,40	74,87	80,20	76,19	84,21	80,20
	-5,00	72,10	73,10	81,20	75,47	77,20	73,34	81,06	77,20
	-4,75	72,10	73,10	89,80	78,33	77,00	73,15	80,85	77,00
	-4,50	72,10	73,10	88,60	77,93	82,20	78,09	86,31	82,20
	-4,25	72,10	73,10	90,60	78,60	82,20	78,09	86,31	82,20
	-4,00	74,50	75,50	90,60	80,20	77,20	73,34	81,06	77,20
	-3,75	71,60	72,60	89,80	78,00	77,20	73,34	81,06	77,20
	-3,50	72,20	73,20	90,60	78,67	82,20	78,09	86,31	82,20
	-3,25	70,70	71,70	89,80	77,40	80,40	76,38	84,42	80,40
	-3,00	74,50	75,50	90,60	80,20	80,40	76,38	84,42	80,40
	-2,75	71,60	72,60	89,80	78,00	81,80	77,71	85,89	81,80
	-2,50	74,50	75,50	90,60	80,20	77,20	73,34	81,06	77,20
	-2,25	71,60	72,60	94,40	79,53	77,60	73,72	81,48	77,60
	-2,00	72,20	73,20	97,00	80,80	81,80	77,71	85,89	81,80
	-1,75	70,70	71,70	96,10	79,50	80,50	76,48	84,53	80,50
	-1,50	74,50	75,50	94,80	81,60	80,50	76,48	84,53	80,50
	-1,25	70,70	71,70	95,30	79,23	82,20	78,09	86,31	82,20
S-AISI5	-1,00	69,90	70,90	92,60	77,80	84,00	79,80	88,20	84,00
	-0,75	70,10	71,10	70,10	70,43	82,20	78,09	86,31	82,20
	-0,50	69,90	70,90	69,90	70,23	83,20	79,04	87,36	83,20
	-0,25	67,30	68,30	67,30	67,63	74,50	70,78	78,23	74,50
	0,00	67,30	70,30	67,30	68,30	67,30	63,94	70,67	67,30

**Tabla E.16.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 6 h. Flanco izquierdo.



S-AISI5	0,00	67,30	70,30	67,30	68,30	67,30	63,94	70,67	67,30
	0,25	70,10	69,30	74,20	71,20	78,80	74,86	82,74	78,80
	0,50	69,40	76,80	71,40	72,53	82,20	78,09	86,31	82,20
	0,75	71,40	87,90	72,10	77,13	82,20	78,09	86,31	82,20
	1,00	72,10	88,40	75,70	78,73	87,60	83,22	91,98	87,60
L-3453 T6 (flanco derecho)	1,25	72,60	107,00	72,10	83,90	88,90	84,46	93,35	88,90
	1,50	74,10	103,00	72,60	83,23	84,00	79,80	88,20	84,00
	1,75	74,10	104,00	74,50	84,20	84,40	80,18	88,62	84,40
	2,00	74,10	102,00	75,70	83,93	82,20	78,09	86,31	82,20
	2,25	73,30	103,00	72,70	83,00	84,00	79,80	88,20	84,00
	2,50	74,10	106,00	74,10	84,73	80,50	76,48	84,53	80,50
	2,75	73,30	108,00	74,10	85,13	80,50	76,48	84,53	80,50
	3,00	77,20	99,00	75,70	83,97	78,80	74,86	82,74	78,80
	3,25	95,80	93,80	93,80	94,47	78,80	74,86	82,74	78,80
	3,50	90,40	88,40	88,40	89,07	82,20	78,09	86,31	82,20
	3,75	85,00	83,00	83,00	83,67	82,20	78,09	86,31	82,20
	4,00	80,20	78,20	78,20	78,87	84,60	80,37	88,83	84,60
	4,25	78,80	76,80	76,80	77,47	87,20	82,84	91,56	87,20
	4,50	80,20	78,20	78,20	78,87	90,20	85,69	94,71	90,20
	4,75	80,50	78,50	78,50	79,17	91,80	87,21	96,39	91,80
	5,00	84,00	82,00	82,00	82,67	91,80	87,21	96,39	91,80
	5,25	89,60	87,60	87,60	88,27	94,80	90,06	99,54	94,80
	5,50	92,80	90,80	90,80	91,47	93,20	88,54	97,86	93,20
	5,75	88,80	95,30	88,80	90,97	95,70	90,92	100,49	95,70
	6,00	87,60	97,60	90,90	92,03	101,00	95,95	106,05	101,00
	6,25	88,80	95,30	92,80	92,30	101,00	95,95	106,05	101,00
	6,50	87,60	97,60	95,80	93,67	96,70	91,87	101,54	96,70
	6,75	88,80	98,50	95,80	94,37	96,70	91,87	101,54	96,70
	7,00	93,20	101,00	95,80	96,67	101,00	95,95	106,05	101,00
	7,25	92,80	102,00	97,10	97,30	95,80	91,01	100,59	95,80
	7,50	93,20	105,00	98,90	99,03	98,50	93,58	103,43	98,50
	7,75	94,90	105,00	98,90	99,60	100,00	95,00	105,00	100,00
	8,00	93,20	102,00	99,80	98,33	101,00	95,95	106,05	101,00
	8,25	94,90	105,00	101,00	100,30	103,00	97,85	108,15	103,00
	8,50	91,60	105,00	101,00	99,20	101,00	95,95	106,05	101,00
	8,75	92,80	103,00	103,00	99,60	102,00	96,90	107,10	102,00
	9,00	93,20	102,00	105,00	100,07	103,00	97,85	108,15	103,00
	9,25	92,80	105,00	103,00	100,27	102,00	96,90	107,10	102,00
	9,50	95,80	105,00	103,00	101,27	102,00	96,90	107,10	102,00
	9,75	94,90	102,00	103,00	99,97	105,00	99,75	110,25	105,00
	10,00	95,80	105,00	105,00	101,93	105,00	99,75	110,25	105,00
	10,25	94,90	103,00	105,00	100,97	105,00	99,75	110,25	105,00
	10,50	95,80	102,00	105,00	100,93	105,00	99,75	110,25	105,00
	10,75	101,00	105,00	105,00	103,67	105,00	99,75	110,25	105,00
	11,00	103,00	105,00	105,00	104,33	105,00	99,75	110,25	105,00
	11,25	102,00	102,00	103,00	102,33	108,00	102,60	113,40	108,00
	11,50	105,00	105,00	103,00	104,33	108,00	102,60	113,40	108,00
	11,75	105,00	105,00	102,00	104,00	108,00	102,60	113,40	108,00
	12,00	101,00	102,00	102,00	101,67	101,00	95,95	106,05	101,00
	12,25	105,00	105,00	105,00	105,00	103,00	97,85	108,15	103,00
	12,50	106,00	105,00	105,00	105,33	103,00	97,85	108,15	103,00
	12,75	106,00	105,00	103,00	104,67	105,00	99,75	110,25	105,00
	13,00	105,00	106,00	105,00	105,33	105,00	99,75	110,25	105,00

Tabla E.17. Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 6 h. Flanco derecho.



	r (mm)	P66 150°C 6h				Media ensayos	Pérdida dureza HV	Estado bruto	Pérdida bruto
		HV1	HV2	HV3	Media	Media	%	Media	%
L-3453 T6 (flanco izquierdo)	-19,00	99,75	110,25	105,00	105,00	106,00	0,00	104,67	0,60
	-18,00	96,90	107,10	102,00	102,00	104,47	0,00	103,67	1,55
	-17,00	95,95	106,05	101,00	101,00	103,67	1,55	101,00	4,08
	-16,00	99,75	110,25	105,00	105,00	104,33	0,92	102,00	3,13
	-15,00	99,75	110,25	105,00	105,00	103,87	1,36	100,60	4,46
	-14,00	97,85	108,15	103,00	103,00	104,73	0,00	99,87	5,16
	-13,00	99,75	110,25	105,00	105,00	105,73	0,00	91,67	12,95
	-12,00	97,85	108,15	103,00	103,00	101,92	3,21	86,27	18,08
	-11,75	99,75	110,25	105,00	105,00	102,71	2,46	81,87	22,25
	-11,50	99,75	110,25	105,00	105,00	100,61	4,46	80,73	23,33
	-11,25	99,75	110,25	105,00	105,00	100,73	4,34	79,70	24,31
	-11,00	96,90	107,10	102,00	102,00	99,12	5,87	76,23	27,60
	-10,75	96,90	107,10	102,00	102,00	99,04	5,94	76,80	27,07
	-10,50	97,85	108,15	103,00	103,00	98,41	6,54	71,93	31,69
	-10,25	99,75	110,25	105,00	105,00	99,20	5,79	69,10	34,38
	-10,00	96,90	107,10	102,00	102,00	96,70	8,17	71,90	31,72
	-9,75	95,95	106,05	101,00	101,00	94,30	10,45	71,77	31,85
	-9,50	93,58	103,43	98,50	98,50	92,67	11,99	69,10	34,38
	-9,25	93,86	103,74	98,80	98,80	92,95	11,73	65,43	37,86
	-9,00	91,11	100,70	95,90	95,90	91,93	12,70	66,53	36,82
	-8,75	87,59	96,81	92,20	92,20	88,96	15,52	62,87	40,30
	-8,50	84,93	93,87	89,40	89,40	86,87	17,51	65,93	37,39
	-8,25	85,98	95,03	90,50	90,50	85,57	18,73	63,70	39,51
	-8,00	86,64	95,76	91,20	91,20	83,57	20,63	65,27	38,02
	-7,75	78,09	86,31	82,20	82,20	82,80	21,37	64,93	38,33
	-7,50	79,80	88,20	84,00	84,00	82,41	21,74	63,03	40,14
	-7,25	78,09	86,31	82,20	82,20	81,15	22,93	63,63	39,57
	-7,00	76,19	84,21	80,20	80,20	81,64	22,47	65,27	38,02
	-6,75	74,86	82,74	78,80	78,80	81,27	22,82	67,73	35,68
	-6,50	74,10	81,90	78,00	78,00	81,07	23,01	64,90	38,37
	-6,25	71,92	79,49	75,70	75,70	79,61	24,40	68,03	35,39
	-6,00	74,96	82,85	78,90	78,90	78,53	25,43	67,83	35,58
	-5,75	74,96	82,85	78,90	78,90	78,21	25,72	69,07	34,41
	-5,50	76,19	84,21	80,20	80,20	80,41	23,64	70,57	32,99
	-5,25	78,09	86,31	82,20	82,20	80,31	23,74	72,73	30,93
	-5,00	75,53	83,48	79,50	79,50	79,82	24,20	70,63	32,92
	-4,75	79,80	88,20	84,00	84,00	82,82	21,35	71,17	32,42
	-4,50	78,28	86,52	82,40	82,40	82,64	21,52	71,67	31,94
	-4,25	79,80	88,20	84,00	84,00	84,54	19,72	72,73	30,93
	-4,00	83,98	92,82	88,40	88,40	84,05	20,18	73,97	29,76
	-3,75	85,12	94,08	89,60	89,60	84,12	20,11	74,23	29,50
	-3,50	90,16	99,65	94,90	94,90	86,35	18,00	73,13	30,55
	-3,25	88,16	97,44	92,80	92,80	85,78	18,54	71,80	31,81
	-3,00	90,16	99,65	94,90	94,90	87,51	16,90	72,87	30,80
	-2,75	87,59	96,81	92,20	92,20	86,81	17,56	73,70	30,01
	-2,50	79,80	88,20	84,00	84,00	85,33	18,97	74,03	29,69
	-2,25	78,09	86,31	82,20	82,20	85,71	18,60	74,57	29,19
	-2,00	79,80	88,20	84,00	84,00	87,08	17,30	75,83	27,98
	-1,75	80,18	88,62	84,40	84,40	86,61	17,75	74,73	29,03
	-1,50	74,86	82,74	78,80	78,80	86,00	18,33	77,03	26,84
	-1,25	71,92	79,49	75,70	75,70	84,71	19,56	77,43	26,46
S-AISI5	-1,00	71,92	79,49	75,70	75,70	85,59	18,71	79,70	24,31
	-0,75	79,80	88,20	84,00	84,00	82,90	21,27	79,00	24,98
	-0,50	79,80	88,20	84,00	84,00	80,35	23,70	72,80	30,86
	-0,25	71,06	78,54	74,80	74,80	73,95	29,78	60,43	42,61
	0,00	67,74	74,87	71,30	71,30	70,13	33,40	60,97	42,10

**Tabla E.18.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 6 h. Flanco izquierdo.

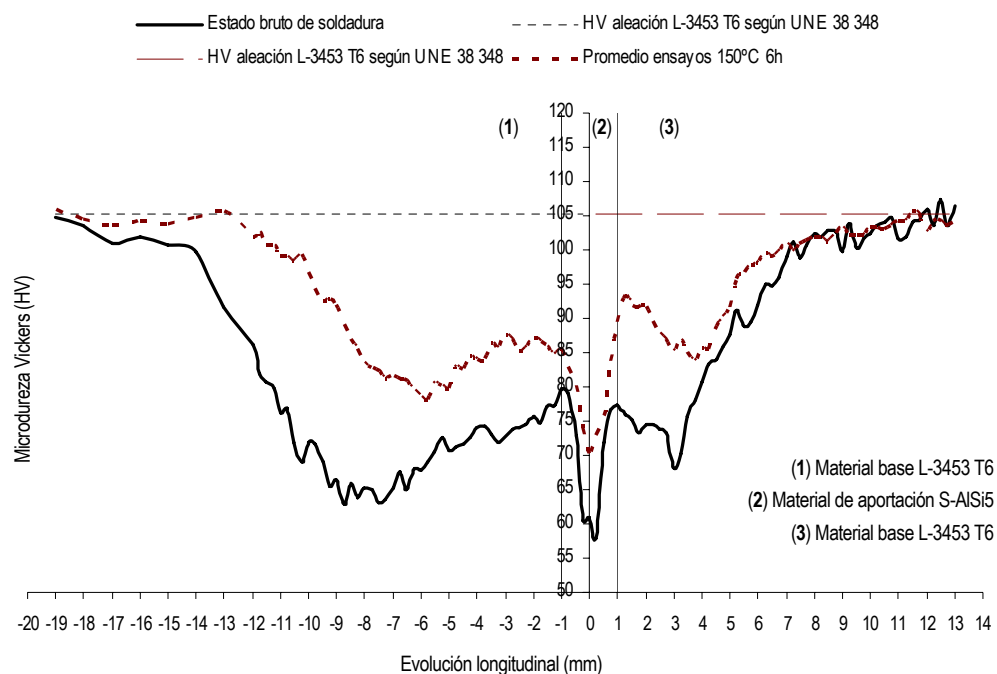




S-AIS5	0,00	67,74	74,87	71,30	71,30	70,13	33,40	60,97	42,10
	0,25	65,93	72,87	69,40	69,40	72,86	30,81	57,77	45,14
	0,50	68,88	76,13	72,50	72,50	75,77	28,05	71,83	31,78
	0,75	73,91	81,69	77,80	77,80	83,91	20,31	76,73	27,13
	1,00	73,91	81,69	77,80	77,80	89,48	15,02	77,47	26,43
L-3453 T6 (flanco derecho)	1,25	75,15	83,06	79,10	79,10	93,38	11,32	75,90	27,92
	1,50	78,09	86,31	82,20	82,20	91,82	12,80	75,27	28,52
	1,75	78,09	86,31	82,20	82,20	91,68	12,93	73,40	30,29
	2,00	79,80	88,20	84,00	84,00	91,56	13,05	74,43	29,31
	2,25	84,46	93,35	88,90	88,90	89,42	15,08	74,43	29,31
	2,50	80,18	88,62	84,40	84,40	87,79	16,63	73,90	29,82
	2,75	78,09	86,31	82,20	82,20	86,95	17,42	73,43	30,26
	3,00	76,48	84,53	80,50	80,50	85,32	18,97	68,17	35,26
	3,25	78,09	86,31	82,20	82,20	86,82	17,55	70,23	33,30
	3,50	74,96	82,85	78,90	78,90	84,95	19,32	75,73	28,08
	3,75	76,00	84,00	80,00	80,00	83,93	20,30	78,10	25,83
	4,00	78,09	86,31	82,20	82,20	85,73	18,58	80,80	23,27
	4,25	76,38	84,42	80,40	80,40	85,48	18,82	83,37	20,83
	4,50	82,08	90,72	86,40	86,40	88,89	15,58	84,10	20,13
	4,75	87,31	96,50	91,90	91,90	90,21	14,33	85,97	18,36
	5,00	87,40	96,60	92,00	92,00	91,77	12,85	87,73	16,68
	5,25	93,58	103,43	98,50	98,50	95,72	9,10	91,17	13,42
	5,50	92,34	102,06	97,20	97,20	96,75	8,12	88,90	15,57
	5,75	92,34	102,06	97,20	97,20	97,97	6,96	89,60	14,91
	6,00	88,16	97,44	92,80	92,80	98,03	6,90	91,93	12,69
	6,25	93,67	103,53	98,60	98,60	99,57	5,44	95,03	9,75
	6,50	95,00	105,00	100,00	100,00	99,07	5,91	94,73	10,03
	6,75	95,95	106,05	101,00	101,00	99,81	5,21	96,07	8,77
	7,00	95,95	106,05	101,00	101,00	100,87	4,21	99,00	5,98
	7,25	91,49	101,12	96,30	96,30	99,81	5,21	101,30	3,80
	7,50	91,01	100,59	95,80	95,80	100,87	4,21	98,80	6,17
	7,75	95,95	106,05	101,00	101,00	101,45	3,65	100,80	4,27
	8,00	99,75	110,25	105,00	105,00	101,80	3,32	102,33	2,82
	8,25	96,90	107,10	102,00	102,00	101,86	3,27	102,00	3,13
	8,50	96,90	107,10	102,00	102,00	101,11	3,98	102,87	2,31
	8,75	99,75	110,25	105,00	105,00	102,45	2,70	102,53	2,63
	9,00	99,75	110,25	105,00	105,00	103,35	1,86	99,80	5,22
	9,25	93,67	103,53	98,60	98,60	102,04	3,10	103,70	1,52
	9,50	93,96	103,85	98,90	98,90	102,03	3,10	100,33	4,72
	9,75	95,95	106,05	101,00	101,00	102,26	2,89	101,77	3,36
	10,00	99,75	110,25	105,00	105,00	103,32	1,88	102,40	2,75
	10,25	99,75	110,25	105,00	105,00	103,33	1,87	103,67	1,55
	10,50	96,90	107,10	102,00	102,00	103,19	2,01	104,00	1,23
	10,75	99,75	110,25	105,00	105,00	103,60	1,61	104,67	0,60
	11,00	99,75	110,25	105,00	105,00	104,27	0,98	101,67	3,45
	11,25	96,90	107,10	102,00	102,00	104,33	0,92	102,00	3,13
	11,50	99,75	110,25	105,00	105,00	105,67	0,00	104,00	1,23
	11,75	99,75	110,25	105,00	105,00	105,27	0,03	104,27	0,98
	12,00	99,75	110,25	105,00	105,00	102,53	2,63	106,00	0,00
	12,25	99,75	110,25	105,00	105,00	104,33	0,92	103,67	1,55
	12,50	99,75	110,25	105,00	105,00	104,27	0,98	107,33	0,00
	12,75	95,95	106,05	101,00	101,00	103,67	1,55	103,67	1,55
	13,00	97,85	108,15	103,00	103,00	104,07	1,17	106,33	0,00

**Tabla E.19.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T6 y L-3453 T6. Reenvejecido a 150°C durante 6 h. Flanco derecho. Resultados de la ganancia obtenida por huella Vickers realizada.





**Fig. E.5.** Evolución longitudinal de la microdureza Vickers para aleaciones L-3453 T6 y L-3453 T6 unidas mediante soldadura con material de aportación S-AISI5 después de almacenamiento térmico adicional a 150°C durante 6 h. Recuperación de propiedades en la zona de afectación térmica. HB = 0.95 HV.

		Cartela refuerzo	Tubo
		L-3453 T6	L-3453 T6
<b>Reenvejecido</b>	Pérdida Máxima	33,4%	20,3%
	Pérdida Media	17,6%	7,9%
<b>Bruto</b>	Pérdida Máxima	45,1%	35,3%
	Pérdida Media	32,1%	12,5%
	Ganancia Relativa Media	14,5%	4,6%
	Ganancia Relativa Media Unión	9,5%	

**Tabla E.20.** Pérdida de propiedades en la zona de afectación térmica para la unión en estado bruto de soldadura y para la unión madurada 6 h a 150°C después del proceso de soldeo. Aumento de la dureza Vickers en ZAT del 9.5%.



## E.3. Unión entre aleaciones L-3453 T4 y L-3453 T4

	r (mm)	P60				P61			
		150°C 1h				150°C 2h			
		HV1	HV2	HV3	Media	HV1	HV2	HV3	Media
L-3453 T4 (flanco izquierdo)	-11,00	74,80	79,29	70,31	74,80	73,30	76,97	69,64	73,30
	-10,75	72,70	77,06	68,34	72,70	72,50	76,13	68,88	72,50
	-10,50	72,40	76,74	68,06	72,40	74,30	78,02	70,59	74,30
	-10,25	69,40	73,56	65,24	69,40	72,50	76,13	68,88	72,50
	-10,00	69,40	73,56	65,24	69,40	73,30	76,97	69,64	73,30
	-9,75	66,20	70,17	62,23	66,20	72,80	76,44	69,16	72,80
	-9,50	66,20	70,17	62,23	66,20	73,50	77,18	69,83	73,50
	-9,25	62,00	65,72	58,28	62,00	68,90	72,35	65,46	68,90
	-9,00	62,00	65,72	58,28	62,00	68,70	72,14	65,27	68,70
	-8,75	61,30	64,98	57,62	61,30	66,30	69,62	62,99	66,30
	-8,50	64,30	68,16	60,44	64,30	63,30	66,47	60,14	63,30
	-8,25	61,20	64,87	57,53	61,20	63,30	66,47	60,14	63,30
	-8,00	64,30	68,16	60,44	64,30	65,40	68,67	62,13	65,40
	-7,75	60,20	63,81	56,59	60,20	63,80	66,99	60,61	63,80
	-7,50	60,20	63,81	56,59	60,20	63,80	66,99	60,61	63,80
	-7,25	58,90	62,43	55,37	58,90	62,70	65,84	59,57	62,70
	-7,00	57,10	60,53	53,67	57,10	63,80	66,99	60,61	63,80
	-6,75	57,10	60,53	53,67	57,10	62,80	65,94	59,66	62,80
	-6,50	58,90	62,43	55,37	58,90	58,90	61,85	55,96	58,90
	-6,25	57,10	60,53	53,67	57,10	59,40	62,37	56,43	59,40
	-6,00	55,10	58,41	51,79	55,10	64,20	67,41	60,99	64,20
	-5,75	55,10	58,41	51,79	55,10	63,40	66,57	60,23	63,40
	-5,50	57,10	60,53	53,67	57,10	63,60	66,78	60,42	63,60
	-5,25	64,10	67,95	60,25	64,10	62,10	65,21	59,00	62,10
	-5,00	66,50	70,49	62,51	66,50	71,30	74,87	67,74	71,30
	-4,75	68,40	72,50	64,30	68,40	71,30	74,87	67,74	71,30
	-4,50	69,40	73,56	65,24	69,40	72,50	76,13	68,88	72,50
	-4,25	70,50	74,73	66,27	70,50	68,40	71,82	64,98	68,40
	-4,00	73,60	78,02	69,18	73,60	68,40	71,82	64,98	68,40
	-3,75	75,20	79,71	70,69	75,20	68,50	71,93	65,08	68,50
	-3,50	74,30	78,76	69,84	74,30	66,50	69,83	63,18	66,50
	-3,25	70,20	74,41	65,99	70,20	69,80	73,29	66,31	69,80
	-3,00	69,80	73,99	65,61	69,80	66,50	69,83	63,18	66,50
	-2,75	68,00	72,08	63,92	68,00	72,30	75,92	68,69	72,30
	-2,50	62,50	66,25	58,75	62,50	74,30	78,02	70,59	74,30
	-2,25	60,20	63,81	56,59	60,20	74,30	78,02	70,59	74,30
	-2,00	59,50	63,07	55,93	59,50	72,80	76,44	69,16	72,80
	-1,75	60,20	63,81	56,59	60,20	70,20	73,71	66,69	70,20
	-1,50	65,00	68,90	61,10	65,00	66,80	70,14	63,46	66,80
	-1,25	67,30	71,34	63,26	67,30	64,80	68,04	61,56	64,80
S-AISI5	-1,00	67,30	71,34	63,26	67,30	63,10	66,26	59,95	63,10
	-0,75	66,30	70,28	62,32	66,30	62,20	65,31	59,09	62,20
	-0,50	66,90	70,91	62,89	66,90	62,20	65,31	59,09	62,20
	-0,25	62,30	66,04	58,56	62,30	60,50	63,53	57,48	60,50
	0,00	60,20	63,81	56,59	60,20	62,20	65,31	59,09	62,20

Tabla E.21. Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T4 y L-3453 T4. Reenvejecido a 150°C durante 1 y 2 h. Flanco izquierdo.



S-AIS5	0,00	60,20	63,81	56,59	60,20	62,20	65,31	59,09	62,20
	0,25	55,80	59,15	52,45	55,80	63,40	66,57	60,23	63,40
	0,50	56,20	59,57	52,83	56,20	68,70	72,14	65,27	68,70
	0,75	62,20	65,93	58,47	62,20	70,50	74,03	66,98	70,50
	1,00	66,00	69,96	62,04	66,00	75,70	79,49	71,92	75,70
L-3453 T4 (flanco derecho)	1,25	65,40	69,32	61,48	65,40	70,50	74,03	66,98	70,50
	1,50	62,40	66,14	58,66	62,40	75,70	79,49	71,92	75,70
	1,75	60,20	63,81	56,59	60,20	75,70	79,49	71,92	75,70
	2,00	61,30	64,98	57,62	61,30	76,60	80,43	72,77	76,60
	2,25	63,40	67,20	59,60	63,40	77,20	81,06	73,34	77,20
	2,50	65,40	69,32	61,48	65,40	76,60	80,43	72,77	76,60
	2,75	65,30	69,22	61,38	65,30	75,70	79,49	71,92	75,70
	3,00	64,80	68,69	60,91	64,80	77,20	81,06	73,34	77,20
	3,25	65,80	69,75	61,85	65,80	77,20	81,06	73,34	77,20
	3,50	65,30	69,22	61,38	65,30	74,30	78,02	70,59	74,30
	3,75	60,30	63,92	56,68	60,30	70,20	73,71	66,69	70,20
	4,00	66,80	70,81	62,79	66,80	69,90	73,40	66,41	69,90
	4,25	70,50	74,73	66,27	70,50	67,40	70,77	64,03	67,40
	4,50	72,50	76,85	68,15	72,50	65,30	68,57	62,04	65,30
	4,75	73,40	77,80	69,00	73,40	60,00	63,00	57,00	60,00
	5,00	72,50	76,85	68,15	72,50	57,10	59,96	54,25	57,10
	5,25	72,50	76,85	68,15	72,50	55,40	58,17	52,63	55,40
	5,50	73,40	77,80	69,00	73,40	54,90	57,65	52,16	54,90
	5,75	69,50	73,67	65,33	69,50	55,40	58,17	52,63	55,40
	6,00	68,60	72,72	64,48	68,60	60,40	63,42	57,38	60,40
	6,25	66,10	70,07	62,13	66,10	59,80	62,79	56,81	59,80
	6,50	64,80	68,69	60,91	64,80	58,60	61,53	55,67	58,60
	6,75	60,20	63,81	56,59	60,20	59,40	62,37	56,43	59,40
	7,00	58,30	61,80	54,80	58,30	60,40	63,42	57,38	60,40
	7,25	60,20	63,81	56,59	60,20	62,20	65,31	59,09	62,20
	7,50	58,10	61,59	54,61	58,10	62,20	65,31	59,09	62,20
	7,75	57,10	60,53	53,67	57,10	60,40	63,42	57,38	60,40
	8,00	55,10	58,41	51,79	55,10	60,40	63,42	57,38	60,40
	8,25	60,40	64,02	56,78	60,40	61,30	64,37	58,24	61,30
	8,50	60,20	63,81	56,59	60,20	60,40	63,42	57,38	60,40
	8,75	58,30	61,80	54,80	58,30	61,30	64,37	58,24	61,30
	9,00	60,20	63,81	56,59	60,20	61,30	64,37	58,24	61,30
	9,25	60,40	64,02	56,78	60,40	62,20	65,31	59,09	62,20
	9,50	60,20	63,81	56,59	60,20	62,20	65,31	59,09	62,20
	9,75	58,10	61,59	54,61	58,10	60,40	63,42	57,38	60,40
	10,00	65,00	68,90	61,10	65,00	61,30	64,37	58,24	61,30
	10,25	68,20	72,29	64,11	68,20	63,80	66,99	60,61	63,80
	10,50	70,10	74,31	65,89	70,10	64,80	68,04	61,56	64,80
	10,75	72,40	76,74	68,06	72,40	68,80	72,24	65,36	68,80
	11,00	74,20	78,65	69,75	74,20	72,40	76,02	68,78	72,40

**Tabla E.22.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T4 y L-3453 T4. Reenvejecido a 150°C durante 1 y 2 h. Flanco derecho.



	r (mm)	P62				P63			
		150°C 3h				150°C 4h			
		HV1	HV2	HV3	Media	HV1	HV2	HV3	Media
L-3453 T4 (flanco izquierdo)	-11,00	64,10	64,74	63,46	64,10	61,50	62,12	60,89	61,50
	-10,75	61,30	61,91	60,69	61,30	62,30	62,92	61,68	62,30
	-10,50	60,20	60,80	59,60	60,20	61,70	62,32	61,08	61,70
	-10,25	60,00	60,60	59,40	60,00	60,20	60,80	59,60	60,20
	-10,00	62,40	63,02	61,78	62,40	61,70	62,32	61,08	61,70
	-9,75	62,40	63,02	61,78	62,40	60,20	60,80	59,60	60,20
	-9,50	61,30	61,91	60,69	61,30	61,70	62,32	61,08	61,70
	-9,25	61,30	61,91	60,69	61,30	62,20	62,82	61,58	62,20
	-9,00	62,40	63,02	61,78	62,40	62,00	62,62	61,38	62,00
	-8,75	60,00	60,60	59,40	60,00	63,50	64,14	62,87	63,50
	-8,50	62,20	62,82	61,58	62,20	65,80	66,46	65,14	65,80
	-8,25	60,00	60,60	59,40	60,00	66,50	67,17	65,84	66,50
	-8,00	62,00	62,62	61,38	62,00	67,80	68,48	67,12	67,80
	-7,75	60,20	60,80	59,60	60,20	64,20	64,84	63,56	64,20
	-7,50	58,90	59,49	58,31	58,90	61,60	62,22	60,98	61,60
	-7,25	56,70	57,27	56,13	56,70	62,00	62,62	61,38	62,00
	-7,00	55,10	55,65	54,55	55,10	62,20	62,82	61,58	62,20
	-6,75	56,20	56,76	55,64	56,20	62,00	62,62	61,38	62,00
	-6,50	60,50	61,11	59,90	60,50	63,50	64,14	62,87	63,50
	-6,25	59,80	60,40	59,20	59,80	65,50	66,16	64,85	65,50
	-6,00	62,70	63,33	62,07	62,70	66,00	66,66	65,34	66,00
	-5,75	63,80	64,44	63,16	63,80	65,70	66,36	65,04	65,70
	-5,50	63,10	63,73	62,47	63,10	65,70	66,36	65,04	65,70
	-5,25	66,80	67,47	66,13	66,80	62,50	63,13	61,88	62,50
	-5,00	70,50	71,21	69,80	70,50	67,00	67,67	66,33	67,00
	-4,75	69,80	70,50	69,10	69,80	62,50	63,13	61,88	62,50
	-4,50	71,20	71,91	70,49	71,20	62,50	63,13	61,88	62,50
	-4,25	72,20	72,92	71,48	72,20	66,40	67,06	65,74	66,40
	-4,00	70,10	70,80	69,40	70,10	67,00	67,67	66,33	67,00
	-3,75	72,30	73,02	71,58	72,30	66,50	67,17	65,84	66,50
	-3,50	70,10	70,80	69,40	70,10	66,50	67,17	65,84	66,50
	-3,25	68,30	68,98	67,62	68,30	67,00	67,67	66,33	67,00
	-3,00	66,80	67,47	66,13	66,80	69,90	70,60	69,20	69,90
	-2,75	62,20	62,82	61,58	62,20	64,50	65,15	63,86	64,50
	-2,50	64,50	65,15	63,86	64,50	64,90	65,55	64,25	64,90
	-2,25	62,20	62,82	61,58	62,20	70,10	70,80	69,40	70,10
	-2,00	63,10	63,73	62,47	63,10	69,90	70,60	69,20	69,90
	-1,75	63,10	63,73	62,47	63,10	67,50	68,18	66,83	67,50
	-1,50	62,20	62,82	61,58	62,20	67,50	68,18	66,83	67,50
	-1,25	63,50	64,14	62,87	63,50	65,70	66,36	65,04	65,70
S-AISI	-1,00	62,20	62,82	61,58	62,20	69,90	70,60	69,20	69,90
	-0,75	63,80	64,44	63,16	63,80	68,40	69,08	67,72	68,40
	-0,50	60,00	60,60	59,40	60,00	67,30	67,97	66,63	67,30
	-0,25	62,00	62,62	61,38	62,00	65,10	65,75	64,45	65,10
	0,00	62,20	62,82	61,58	62,20	61,30	61,91	60,69	61,30

**Tabla E.23.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T4 y L-3453 T4. Reenvejecido a 150°C durante 3 y 4 h. Flanco izquierdo.



S-AISI5	0,00	62,20	62,82	61,58	62,20	61,30	61,91	60,69	61,30
	0,25	60,20	60,80	59,60	60,20	62,30	62,92	61,68	62,30
	0,50	62,20	62,82	61,58	62,20	65,30	65,95	64,65	65,30
	0,75	62,00	62,62	61,38	62,00	68,40	69,08	67,72	68,40
	1,00	64,80	65,45	64,15	64,80	71,30	72,01	70,59	71,30
L-3453 T4 (flanco derecho)	1,25	65,80	66,46	65,14	65,80	70,20	70,90	69,50	70,20
	1,50	66,40	67,06	65,74	66,40	70,20	70,90	69,50	70,20
	1,75	68,20	68,88	67,52	68,20	69,40	70,09	68,71	69,40
	2,00	72,40	73,12	71,68	72,40	68,60	69,29	67,91	68,60
	2,25	70,20	70,90	69,50	70,20	67,50	68,18	66,83	67,50
	2,50	69,80	70,50	69,10	69,80	67,50	68,18	66,83	67,50
	2,75	70,20	70,90	69,50	70,20	62,50	63,13	61,88	62,50
	3,00	69,80	70,50	69,10	69,80	66,00	66,66	65,34	66,00
	3,25	70,20	70,90	69,50	70,20	62,50	63,13	61,88	62,50
	3,50	70,20	70,90	69,50	70,20	62,50	63,13	61,88	62,50
	3,75	66,00	66,66	65,34	66,00	66,40	67,06	65,74	66,40
	4,00	66,40	67,06	65,74	66,40	66,40	67,06	65,74	66,40
	4,25	62,20	62,82	61,58	62,20	66,40	67,06	65,74	66,40
	4,50	61,20	61,81	60,59	61,20	64,30	64,94	63,66	64,30
	4,75	60,00	60,60	59,40	60,00	64,30	64,94	63,66	64,30
	5,00	61,20	61,81	60,59	61,20	64,30	64,94	63,66	64,30
	5,25	60,00	60,60	59,40	60,00	65,70	66,36	65,04	65,70
	5,50	62,20	62,82	61,58	62,20	65,70	66,36	65,04	65,70
	5,75	62,00	62,62	61,38	62,00	66,20	66,86	65,54	66,20
	6,00	62,40	63,02	61,78	62,40	66,00	66,66	65,34	66,00
	6,25	62,70	63,33	62,07	62,70	66,00	66,66	65,34	66,00
	6,50	62,70	63,33	62,07	62,70	66,20	66,86	65,54	66,20
	6,75	62,20	62,82	61,58	62,20	66,20	66,86	65,54	66,20
	7,00	62,70	63,33	62,07	62,70	66,00	66,66	65,34	66,00
	7,25	62,20	62,82	61,58	62,20	63,30	63,93	62,67	63,30
	7,50	60,00	60,60	59,40	60,00	62,20	62,82	61,58	62,20
	7,75	60,20	60,80	59,60	60,20	62,00	62,62	61,38	62,00
	8,00	62,70	63,33	62,07	62,70	63,30	63,93	62,67	63,30
	8,25	60,10	60,70	59,50	60,10	62,00	62,62	61,38	62,00
	8,50	61,10	61,71	60,49	61,10	62,20	62,82	61,58	62,20
	8,75	64,20	64,84	63,56	64,20	62,00	62,62	61,38	62,00
	9,00	62,70	63,33	62,07	62,70	62,00	62,62	61,38	62,00
	9,25	61,20	61,81	60,59	61,20	60,10	60,70	59,50	60,10
	9,50	62,20	62,82	61,58	62,20	59,80	60,40	59,20	59,80
	9,75	61,50	62,12	60,89	61,50	62,20	62,82	61,58	62,20
	10,00	62,70	63,33	62,07	62,70	63,40	64,03	62,77	63,40
	10,25	64,50	65,15	63,86	64,50	62,00	62,62	61,38	62,00
	10,50	61,30	61,91	60,69	61,30	62,20	62,82	61,58	62,20
	10,75	60,20	60,80	59,60	60,20	61,80	62,42	61,18	61,80
	11,00	61,30	61,91	60,69	61,30	62,20	62,82	61,58	62,20

**Tabla E.24.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T4 y L-3453 T4. Reenvejecido a 150°C durante 3 y 4 h. Flanco izquierdo.



	r (mm)	P64				P57 - P58 - P59			
		150°C 5h				150°C 6h			
		HV1	HV2	HV3	Media	HV1	HV2	HV3	Media
L-3453 T4 (flanco izquierdo)	-11,00	59,80	60,40	59,20	59,80	69,60	73,08	66,12	69,60
	-10,75	58,40	58,98	57,82	58,40	69,60	73,08	66,12	69,60
	-10,50	60,50	61,11	59,90	60,50	65,40	68,67	62,13	65,40
	-10,25	62,00	62,62	61,38	62,00	68,60	72,03	65,17	68,60
	-10,00	63,60	64,24	62,96	63,60	65,80	69,09	62,51	65,80
	-9,75	63,60	64,24	62,96	63,60	63,50	66,68	60,33	63,50
	-9,50	62,00	62,62	61,38	62,00	62,90	66,05	59,76	62,90
	-9,25	63,20	63,83	62,57	63,20	60,20	63,21	57,19	60,20
	-9,00	60,00	60,60	59,40	60,00	65,80	69,09	62,51	65,80
	-8,75	61,50	62,12	60,89	61,50	61,30	64,37	58,24	61,30
	-8,50	64,10	64,74	63,46	64,10	60,20	63,21	57,19	60,20
	-8,25	60,00	60,60	59,40	60,00	63,10	66,26	59,95	63,10
	-8,00	63,60	64,24	62,96	63,60	65,80	69,09	62,51	65,80
	-7,75	62,50	63,13	61,88	62,50	63,10	66,26	59,95	63,10
	-7,50	62,80	63,43	62,17	62,80	61,30	64,37	58,24	61,30
	-7,25	61,20	61,81	60,59	61,20	60,20	63,21	57,19	60,20
	-7,00	60,00	60,60	59,40	60,00	59,10	62,06	56,15	59,10
	-6,75	61,20	61,81	60,59	61,20	59,10	62,06	56,15	59,10
	-6,50	60,00	60,60	59,40	60,00	60,20	63,21	57,19	60,20
	-6,25	62,10	62,72	61,48	62,10	59,10	62,06	56,15	59,10
	-6,00	56,30	56,86	55,74	56,30	57,50	60,38	54,63	57,50
	-5,75	56,20	56,76	55,64	56,20	58,80	61,74	55,86	58,80
	-5,50	56,30	56,86	55,74	56,30	58,70	61,64	55,77	58,70
	-5,25	55,50	56,06	54,95	55,50	59,10	62,06	56,15	59,10
	-5,00	55,10	55,65	54,55	55,10	58,70	61,64	55,77	58,70
	-4,75	57,50	58,08	56,93	57,50	59,10	62,06	56,15	59,10
	-4,50	58,60	59,19	58,01	58,60	58,70	61,64	55,77	58,70
	-4,25	60,00	60,60	59,40	60,00	60,20	63,21	57,19	60,20
	-4,00	66,00	66,66	65,34	66,00	58,70	61,64	55,77	58,70
	-3,75	64,80	65,45	64,15	64,80	60,20	63,21	57,19	60,20
	-3,50	62,00	62,62	61,38	62,00	58,80	61,74	55,86	58,80
	-3,25	62,20	62,82	61,58	62,20	58,80	61,74	55,86	58,80
	-3,00	64,80	65,45	64,15	64,80	58,70	61,64	55,77	58,70
	-2,75	64,50	65,15	63,86	64,50	61,30	64,37	58,24	61,30
	-2,50	64,80	65,45	64,15	64,80	60,20	63,21	57,19	60,20
	-2,25	62,20	62,82	61,58	62,20	61,30	64,37	58,24	61,30
	-2,00	64,80	65,45	64,15	64,80	60,20	63,21	57,19	60,20
	-1,75	66,00	66,66	65,34	66,00	63,10	66,26	59,95	63,10
	-1,50	64,80	65,45	64,15	64,80	60,20	63,21	57,19	60,20
	-1,25	62,20	62,82	61,58	62,20	61,30	64,37	58,24	61,30
S-AISI	-1,00	66,00	66,66	65,34	66,00	60,20	63,21	57,19	60,20
	-0,75	62,20	62,82	61,58	62,20	60,80	63,84	57,76	60,80
	-0,50	58,40	58,98	57,82	58,40	61,90	65,00	58,81	61,90
	-0,25	56,60	57,17	56,03	56,60	60,20	63,21	57,19	60,20
	0,00	57,10	57,67	56,53	57,10	61,30	64,37	58,24	61,30

**Tabla E.25.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T4 y L-3453 T4. Reenvejecido a 150°C durante 5 y 6 h. Flanco izquierdo.

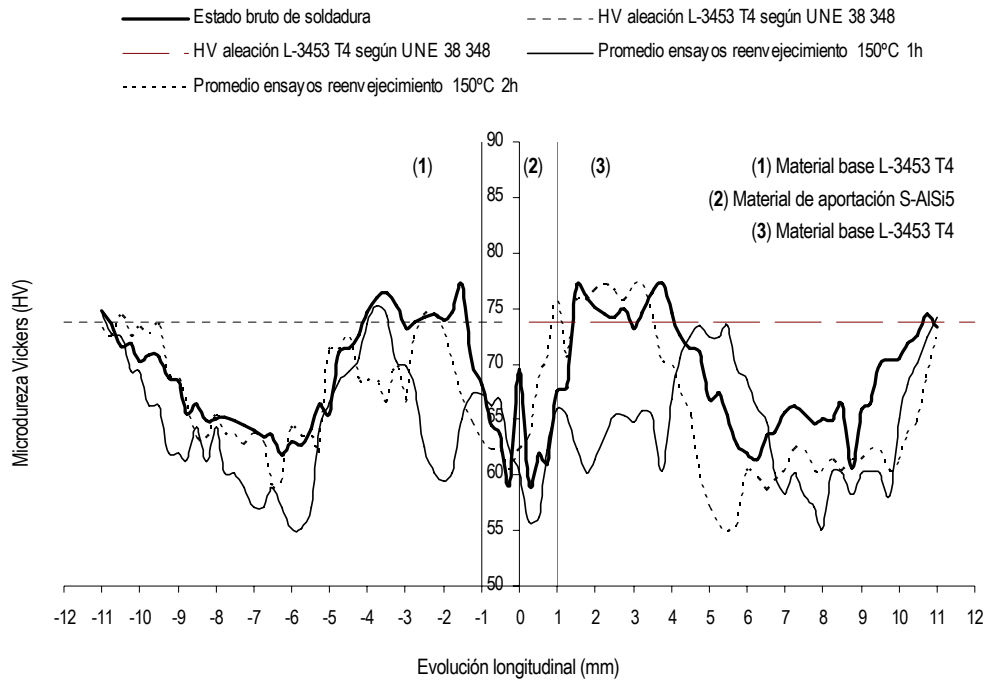


S-AIS5	0,00	57,10	57,67	56,53	57,10	61,30	64,37	58,24	61,30
	0,25	57,10	57,67	56,53	57,10	61,30	64,37	58,24	61,30
	0,50	58,40	58,98	57,82	58,40	60,20	63,21	57,19	60,20
	0,75	62,20	62,82	61,58	62,20	60,20	63,21	57,19	60,20
	1,00	68,60	69,29	67,91	68,60	60,20	63,21	57,19	60,20
L-3453 T4 (flanco derecho)	1,25	64,50	65,15	63,86	64,50	58,80	61,74	55,86	58,80
	1,50	66,00	66,66	65,34	66,00	59,60	62,58	56,62	59,60
	1,75	66,20	66,86	65,54	66,20	58,70	61,64	55,77	58,70
	2,00	66,00	66,66	65,34	66,00	57,90	60,80	55,01	57,90
	2,25	61,20	61,81	60,59	61,20	60,20	63,21	57,19	60,20
	2,50	61,20	61,81	60,59	61,20	60,20	63,21	57,19	60,20
	2,75	64,80	65,45	64,15	64,80	58,70	61,64	55,77	58,70
	3,00	60,20	60,80	59,60	60,20	56,90	59,75	54,06	56,90
	3,25	59,80	60,40	59,20	59,80	58,80	61,74	55,86	58,80
	3,50	59,50	60,10	58,91	59,50	59,60	62,58	56,62	59,60
	3,75	61,30	61,91	60,69	61,30	60,20	63,21	57,19	60,20
	4,00	61,70	62,32	61,08	61,70	60,90	63,95	57,86	60,90
	4,25	60,00	60,60	59,40	60,00	61,30	64,37	58,24	61,30
	4,50	62,20	62,82	61,58	62,20	63,10	66,26	59,95	63,10
	4,75	60,00	60,60	59,40	60,00	61,30	64,37	58,24	61,30
	5,00	62,20	62,82	61,58	62,20	61,10	64,16	58,05	61,10
	5,25	62,00	62,62	61,38	62,00	61,30	64,37	58,24	61,30
	5,50	64,30	64,94	63,66	64,30	60,20	63,21	57,19	60,20
	5,75	63,90	64,54	63,26	63,90	60,20	63,21	57,19	60,20
	6,00	64,30	64,94	63,66	64,30	61,10	64,16	58,05	61,10
	6,25	64,30	64,94	63,66	64,30	61,30	64,37	58,24	61,30
	6,50	63,30	63,93	62,67	63,30	61,60	64,68	58,52	61,60
	6,75	61,20	61,81	60,59	61,20	59,60	62,58	56,62	59,60
	7,00	63,30	63,93	62,67	63,30	60,20	63,21	57,19	60,20
	7,25	61,70	62,32	61,08	61,70	59,10	62,06	56,15	59,10
	7,50	62,20	62,82	61,58	62,20	60,20	63,21	57,19	60,20
	7,75	62,00	62,62	61,38	62,00	60,20	63,21	57,19	60,20
	8,00	61,70	62,32	61,08	61,70	60,80	63,84	57,76	60,80
	8,25	60,20	60,80	59,60	60,20	62,20	65,31	59,09	62,20
	8,50	60,20	60,80	59,60	60,20	63,10	66,26	59,95	63,10
	8,75	62,20	62,82	61,58	62,20	60,20	63,21	57,19	60,20
	9,00	60,20	60,80	59,60	60,20	61,10	64,16	58,05	61,10
	9,25	61,40	62,01	60,79	61,40	60,20	63,21	57,19	60,20
	9,50	61,70	62,32	61,08	61,70	60,20	63,21	57,19	60,20
	9,75	62,20	62,82	61,58	62,20	61,30	64,37	58,24	61,30
	10,00	61,40	62,01	60,79	61,40	63,10	66,26	59,95	63,10
	10,25	62,00	62,62	61,38	62,00	63,10	66,26	59,95	63,10
	10,50	62,00	62,62	61,38	62,00	61,30	64,37	58,24	61,30
	10,75	62,20	62,82	61,58	62,20	65,80	69,09	62,51	65,80
	11,00	60,20	60,80	59,60	60,20	68,60	72,03	65,17	68,60

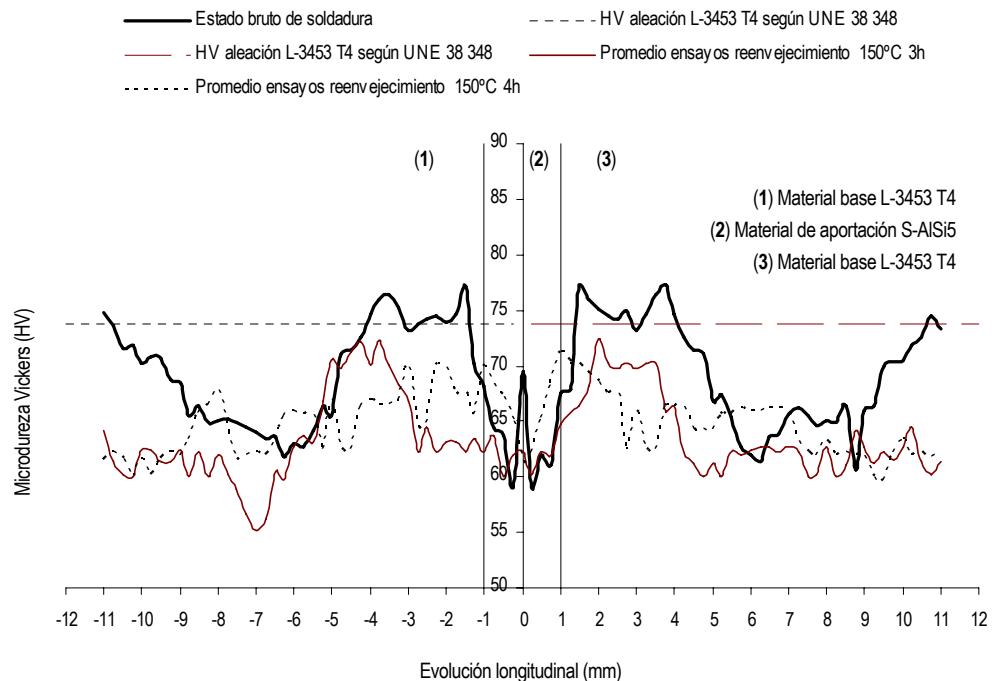
**Tabla E.26.** Evolución longitudinal de microdureza Vickers HV para la unión soldada entre L-3453 T4 y L-3453 T4. Reenvejecido a 150°C durante 5 y 6 h. Flanco derecho.





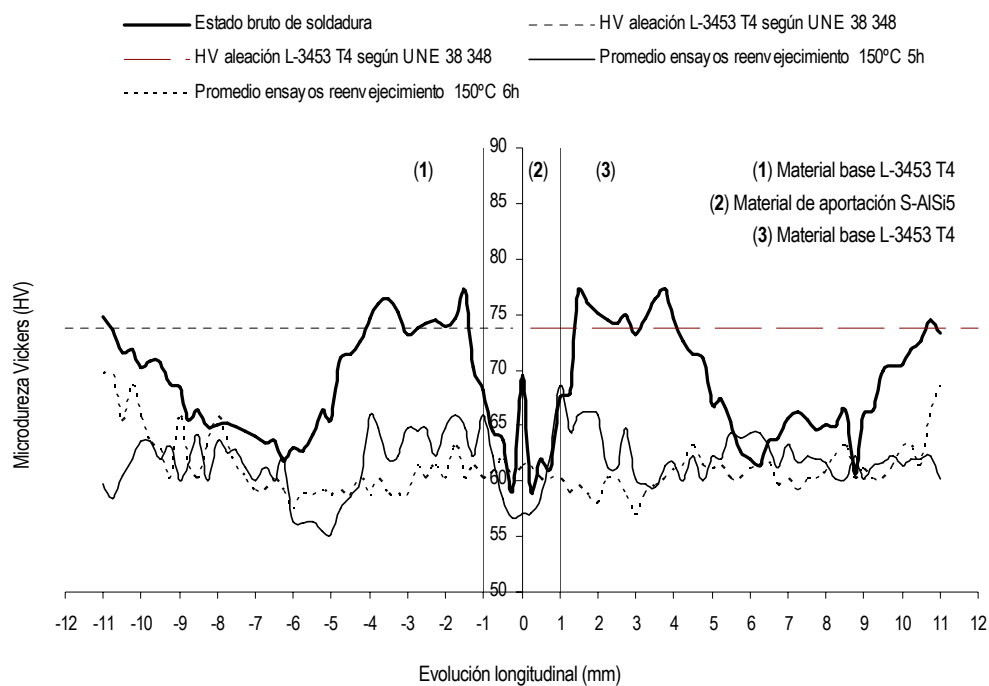


**Fig. E.6.** Evolución longitudinal de la microdureza Vickers para aleaciones L-3453 T4 unidas mediante soldadura con material de aportación S-AISI5 con almacenamiento térmico adicional a 150°C durante 1 y 2 h. Propiedades parcialmente afectadas después del tratamiento térmico. HB = 0.95 HV.



**Fig. E.7.** Evolución longitudinal de la microdureza Vickers para aleaciones L-3453 T4 unidas mediante soldadura con material de aportación S-AISI5 con almacenamiento térmico adicional a 150°C durante 3 y 4 h. Descenso de las propiedades después del tratamiento térmico. Sobreenuvejecimiento de la unión. HB = 0.95 HV.





**Fig. E.8.** Evolución longitudinal de la microdureza Vickers para aleaciones L-3453 T4 unidas mediante soldadura con material de aportación S-AISI5 con almacenamiento térmico adicional a 150°C durante 5 y 6 h. Descenso de las propiedades después del tratamiento térmico. Sobreenviejimiento de la unión. HB = 0.95 HV.



## F. Estudio de impacto ambiental (EIA)

### F.1. Introducción

Como ya se ha argumentado en el cuerpo de la memoria del proyecto, la actividad añadida que supone la modificación óptima para el logro de un aumento de la vida en servicio de las estructuras cerradas estudiadas, siendo esta la mejor técnica disponible, es la introducción de un proceso de granallado o *shot peening*.

Para el proceso citado se contempla a continuación un estudio de impacto ambiental únicamente para la actividad añadida considerándose los puntos siguientes:

1. La evaluación de impacto ambiental que supone la fabricación de estructuras cerradas de aluminio mediante unión soldada ya ha sido realizada.
2. El estudio de impacto ambiental presente para la optimización de las estructuras citadas completa y cierra el estudio mencionado en el punto anterior para la optimización de la vida en servicio de las estructuras.

La evaluación ambiental, de acuerdo con la Ley 3/1998, de la intervención integral de la Administración ambiental, consiste en el análisis de los efectos y los resultados medioambientales de la actividad introducida, que comprende la descripción de la actividad y, específicamente las instalaciones, las materias primas y auxiliares, todo tipo de emisiones y las repercusiones de estas sobre el medio. El estudio consta de las partes siguientes:

1. Identificación de las instalaciones.
2. Análisis de las emisiones y las repercusiones de estas sobre el Medio Ambiente.
3. Prácticas de gestión ambiental y propuestas de mejora.
4. Conclusiones.

El objeto del presente apartado es regular el impacto ambiental del proceso de granallado escogido y la gestión de Residuos industriales tomando como referencia la legislación existente: Ley 6/1993 reguladora de los Residuos; *Decret* 115/1994 y 93/1999, reguladora del Registro general de gestores de Residuos de Cataluña; DOGC núm.1498, de 27/09/1991.

### F.2. Datos generales de la actividad propuesta

Para el proceso de *shot peening* se contempla la posibilidad de la realización del proceso sobre las estructuras estudiadas en la planta de IPAR BLAST S.L. y es por este motivo que para los datos en que sea necesario la especificación de una ubicación de la actividad así como datos de horas de las actividades y tiempos de ciclos de trabajo se adjuntan los datos facilitados por la empresa.

**Organización del centro.** Los días laborables semanales son cinco, siendo estos de lunes a viernes. El horario laboral para el funcionamiento de la instalación es de 6:00 a 14:00 h. Los periodos de inactividad de la instalación comprende el mes de Agosto, Navidades y Semana Santa.



**Entorno de la actividad.** La actividad industrial desarrollada es la primera instalación edificada en el emplazamiento presente (Tabla F.1.).

Municipio	Tipo de suelo <sup>(1)</sup>	Calificación urbanística <sup>(2)</sup>	Distancia
Zaldibar	Urbano	Industrial	0 km
Ermua	Urbano	Mixta	2,3 km
Eibar	Urbano	Mixta	2,4 km

**Tabla F.2.** Entorno de la instalación. <sup>(1)</sup>: urbano, urbanizable, de protección especial (Ley 6/1998 sobre el régimen del suelo y valoraciones); <sup>(2)</sup>: industrial, agrícola, comercial, residencial, mixta, construcciones aisladas, construcciones agrupadas.

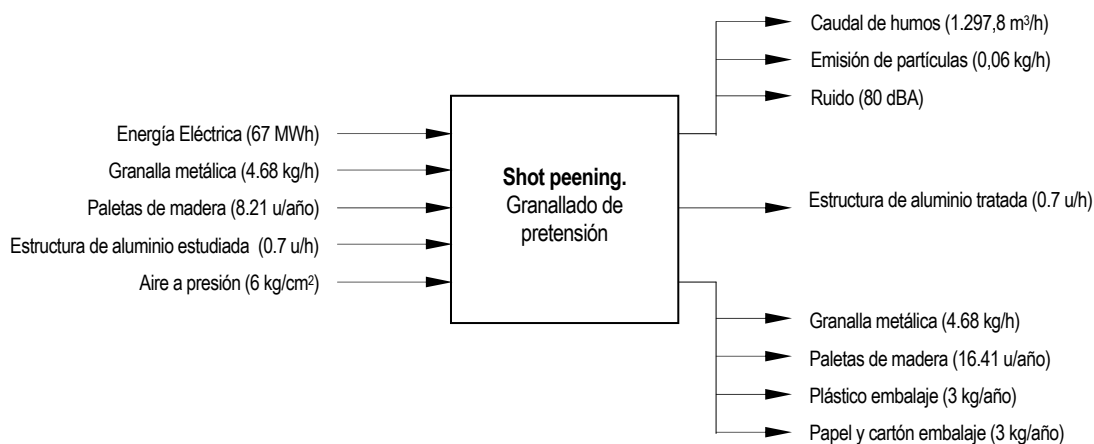
### F.3. Descripción de la actividad

A continuación se adjunta el diagrama de flujos de la actividad propuesta correspondiente al proceso de granallado con perdigones el cual informa de las materias primas utilizadas, flujos de materia y energía y residuos generados en el proceso.

Tal y como ya se ha argumentado en la memoria, el granallado es un proceso superficial, aunque con influencia más profunda, en el cual se produce un impacto directo de la granalla metálica sobre la pieza a tratar. Normalmente este tipo de procesos han sido comúnmente utilizados para el mordentado de piezas de acero las cuales acumulan, producto de su almacenaje o transporte, óxidos que precisan de eliminación para otros procedimientos superficiales a realizar sobre la pieza tales como la aplicación de pinturas y barnices.

El *shot peening* es, en cambio, un proceso de granallado localizado en el cual se precisa de la eliminación de tensiones residuales para la optimización de la vida en servicio del elemento o pieza a tratar.

Para el proceso descrito en la memoria (véase apartado 10.2.) se adjunta a continuación la descripción de la maquinaria utilizada y una relación de características a fin de definir los flujos energéticos y de materia anuales (Fig. F.1. y Tabla F.3.).



**Fig. F.1.** Diagrama de flujos del proceso de *shot peening* seleccionado.



Maquinaria	Descripción / Tipo
Instalación <i>shot peening</i>	Instalación manual de IPAR BLAST S.L.

Materias primas	Descripción / Tipo
Granalla metálica	Paletas con 40 bolsas de 25 kg de granalla. D = 0,25
Aire a presión	Conexión instalación a 6 kg/cm <sup>2</sup>
Pieza a granallar	Estructuras de aprovisionamiento objeto del presente estudio

Datos energéticos del proceso	Descripción / Valor
Horas de funcionamiento anuales	3500 h/año
Consumo instalación anual	67 MWh
% O <sub>2</sub> en la salida	20.9%
Humedad absoluta de los humos	1,6
Velocidad de los humos en la salida	5.1 m/s
Diámetro chimenea (salida de humos)	0.3 m
Caudal de humos en la salida	1.297,8 m <sup>3</sup> /h

Datos de residuos del proceso	Descripción / Valor
Horas de funcionamiento anuales	3500 h/año
Tipo de emisión atmosférica	Partículas y sólidos en suspensión
Emisión de partículas sólidas	0.06 kg/h
Consumo de granalla	4,68 kg/h
Consumo de paletas	16,41 u/año
Consumo papel/cartón embalajes	3 kg/año
Consumo de plástico embalajes	3 kg/año
Nivel acústico medio jornada laboral	80 dBA

Tabla F.3. Descripción de la instalación, materias primas, datos energéticos y residuos generados en el proceso de *shot peening*.

#### F.4. Evaluación de los efectos del proyecto

A continuación se observa los efectos de la modificación introducida en el proceso sobre el medio físico (Tabla F.4.).

Campo	Tipo efecto	Descripción
Población	Directo	Inhalación de residuos metálicos sólidos
Fauna y flora	Indirecto	Deposición de residuos sólidos metálicos
Suelo	Indirecto	Deposición de residuos sólidos metálicos
Aire	Directo	Contaminación en forma de sólidos en suspensión
Agua	-	No se contempla para las cantidades o niveles logrados
Factores climáticos	-	No se contempla para las cantidades o niveles logrados
Paisaje	-	No se contempla para las cantidades o niveles logrados
Bienes materiales	-	No se contempla para las cantidades o niveles logrados
Patrimonio histórico-artístico	-	No se contempla para las cantidades o niveles logrados
Patrimonio arqueológico	-	No se contempla para las cantidades o niveles logrados

Tabla F.4. Descripción de los efectos sobre el medio de la modificación propuesta en referencia al proceso introducido.



## F.5. Actuaciones para la minimización de los efectos del proyecto

La legislación actual recomienda del uso de traje y máscara integral protectora con objeto de evitar los impactos de la granalla metálica e inhalación de los fragmentos de la misma sobre el operario para la garantizar la seguridad e higiene del operario especializado en la sala de la instalación manual de *shot peening*.

Para la eliminación parcial de los sólidos en suspensión generados en el proceso de granallado se adoptan las medidas típicas para este tipo de instalaciones acoplado en la salida de la instalación. Estas son:

- Sistema de aspiración integrado en el equipo de granallado con aspirador centrífugo tipo BFB-28/2.
- Sistema de filtración por cartuchos en paralelo tipo CAR-4G de dimensiones 327 x 602 mm.

El límite de admisión en la emisión de partículas según la legislación actual se establece en 0.1832 kg/h para este tipo de instalaciones. Con las medidas implementadas se logra una emisión de partículas después de la filtración de 0.06 kg/h lo cual significa que se emite un caudal de 33% sobre el máximo permitido. Son, por tanto, correctas y eficientes las medidas tomadas en la instalación.

En referencia a los niveles acústicos de la maquinaria con relación al dato aportado (80 dBA) no es necesario el uso de cascos según la legislación actual ya que el límite acústico admisible para la utilización de cascos se establece en 85 dBA.

## F.6. Gestión de los residuos producidos en el proceso

### F.6.1. Gestión de residuos. Generalidades

Todo residuo que se genere deberá estar controlado por el Departamento de Mantenimiento. Este departamento abrirá una Ficha de Aceptación, con la cuál se establece un contrato entre el productor/poseedor del residuo y su gestor. Es suministrada por la Junta de Residuos, y consta de tres apartados: *Productor*, *Residuo* y *Gestor*.

Como *Productor* de residuos constará el código de productor. Este código figurará en todas las Fichas de Aceptación ya que es el que la Junta de Residuos le ha asignado a la empresa cómo Productor de Residuos.

Como *Residuo* debe constar la descripción de éste con su código correspondiente especificado si es inerte, no especial, o especial, así cómo la cantidad estimada anual u ocasional, la referencia de ensayo de caracterización del residuo y observaciones si procede.

Como *Gestor* debe constar el código que la Junta de Residuos le ha asignado, la razón social y el Municipio donde se gestiona el residuo.

Se formalizarán tantas Fichas de Aceptación como tipos de residuo se generen. Finalmente irá firmada y sellada por la Junta de Residuos, por el Productor y por el Gestor. Una vez formalizada la Ficha de Aceptación, se genera una Hoja de Seguimiento, también facilitada por la Junta de residuos. Es un documento de control para el transporte del residuo, en el cual se refleja básicamente el número de la Ficha de Aceptación, la descripción del residuo, precauciones a adoptar para el transporte y en caso de accidente y los códigos del Residuo, Productor/Poseedor, Transportista y Gestor. Esta hoja va firmada y sellada por cada uno de ellos, destinando una copia a la Junta de Residuos, Ayuntamiento, Productor, Tratador y Transportista.



En el caso que el transportista lleve mas de un residuo compatibles entre si y hasta un máximo de veinte productores diferentes se formalizará una Hoja de Seguimiento Itinerante, la cual tiene la misma función que la Hoja de Seguimiento, suministrada igualmente por la Junta de Residuos y firmada, rellena y sellada por el transportista, por los centros generadores y por el tratador.

Si el residuo debe destinarse a otra comunidad Autónoma o a otro País, se formalizará un documento de control y seguimiento de residuos peligrosos, suministrado por el gestor y sellado por la Junta de Residuos.

Tanto la Ficha de Aceptación, como las Hojas de Seguimiento se archivarán como comprobante de la correcta gestión del residuo, entregando la copia de la Hoja de Seguimiento al Departamento de Medio Ambiente y una copia de la Ficha de Aceptación.

Un Residuo, ya sea inerte no especial o especial, no se almacenará por más de seis meses, de lo contrario deberá comunicarse a la Junta de Residuos, ya que se entiende que su tratamiento es dificultoso y no se encuentra Gestor.

Anualmente se hará la declaración de Residuos con los diferentes tipos que se han generado, indicando la cantidad, tipología y gestión que se le ha dado.

Como ya se ha explicitado en apartados anteriores los subproductos del proceso compren la gestión de paletas y la granalla de acero mediante empresas dedicadas a tal efecto.

#### **F.6.2. Gestión de la granalla como chatarra de acero**

Toda la granalla generada por el proceso se depositará por separado en unos contenedores identificados y apropiados para tal fin situados y agrupados en el parque de residuos sólidos de la empresa. Los manipuladores de esta serán los carretilleros y las personas asignadas por el Departamento de Producción. La granalla de acero, como chatarra ferrosa, se distribuirá y colocará dentro del contenedor de viruta de hierro correspondiente.

Los contenedores para la granalla y virutas serán preferiblemente propiedad de la empresa gestora de residuos a terceros y en régimen de depósito. Para la granalla se dispondrá de un contenedor para la viruta de hierro y se evitará el abocamiento en el contenedor de chatarra diferenciándose en dos contenedores chatarra y viruta.

Cuando uno o varios de cualquiera de los contenedores estén llenos, el Departamento de Medio Ambiente se encargará de avisar al Gestor adecuado para la recuperación y/o la valorización del residuo.

Todos los contenedores se colocarán y agruparán en el parque de residuos sólidos de tal forma que no obstruyan el paso y sean de fácil acceso para los manipuladores asignados, tanto para su llenado en la empresa como para su retirada por el Gestor con el camión apropiado.

Todos estos residuos irán acompañados de una sola Hoja de Seguimiento con el mismo código de residuo tal y como se ha indicado en las generalidades anteriores

#### **F.6.3. Gestión de paletas de madera**

Todas las paletas y trozos de madera de cualquier forma y tamaño que no sean útiles, se depositarán en el parque de Residuos sólidos, apilando las paletas en columnas de 20 unidades, y depositando los trozos de madera dentro de un contenedor identificado para tal fin.



Cuando haya una cantidad suficiente de paletas que justifique el transporte y/o el contenedor esté lleno, el Departamento de Mantenimiento avisará a un recuperador de residuos no especiales autorizado por la Junta de Residuos para que los retire.

Este Residuo irá acompañado de su correspondiente hoja de seguimiento debidamente cumplimentada.

#### **F.6.4. Gestión de papel y cartón**

Todo el cartón que se genere y no sea útil se depositará en el parque de residuos sólidos dentro de un contenedor, identificado para tal fin.

El almacenamiento lo efectuará el manipulador del cartón, el cual, lo apilará dentro del contenedor de forma y manera que ocupe el menor espacio posible.

Cuando el contenedor esté lleno, el manipulador lo comunicará a portería, el personal de portería llamará a la empresa autorizada para la gestión de residuos a terceros de papel y cartón.

Este Residuo irá acompañado de su correspondiente hoja de seguimiento debidamente cumplimentada.

#### **F.6.5. Gestión de plásticos**

Cualquier pieza de plástico y trozos de cualquier forma y tamaño que no sean útiles, se depositarán en el parque de residuos sólidos, en unos contenedores identificados para tal fin.

Cuando haya una cantidad suficiente de plástico que justifique el transporte el Departamento de Medio Ambiente avisará a un Recuperador de Residuos no especiales autorizado por la Junta para que los retire.

Provisionalmente y cuando no sea posible la valorización externa del plástico, este se depositará dentro del contenedor de los desperdicios generales no recogidos selectivamente.

Este Residuo irá acompañado de su correspondiente hoja de seguimiento debidamente cumplimentada.

### **F.7. Conclusiones del EIA**

Como ya se ha argumentado anteriormente, éste es un estudio de impacto ambiental adicional al que ya debe existir en la empresa en que vaya a ser necesaria la implantación de tal maquinaria, complementa y completa el estudio de impacto ambiental general de la planta ya existente.

Por lo tanto, el resultado de las actuaciones en cuestión de reducción de las emisiones de partículas para la instalación seleccionada es efectiva y se establece dentro del marco legislativo actual en cuestión medioambiental, de higiene y seguridad laboral.

